

**UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID**  
**ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR**  
**INGENIERÍA INDUSTRIAL**

**PROYECTO FIN DE CARRERA.**

**SIMULACION AMBIENTAL DEL TRÁFICO EN LAS  
CERCANÍAS DE LA GLORIETA DE LAS PIRÁMIDES.**



**AUTOR: ANTONIO ALEJANDRO GONZÁLEZ LÁZARO**  
**TUTORA: CAROLINA ÁLVAREZ CALDAS**

**LEGANÉS. JULIO 2009**

## ÍNDICE DE CONTENIDOS.

1.INTRODUCCIÓN.....	12
2.OBJETIVOS.....	16
3.INGENIERÍA DE TRÁFICO. ....	19
3.1.PARÁMETROS FUNDAMENTALES DEL TRÁFICO.....	23
3.1.1.Intensidad.....	23
3.1.1.1. Ciclos temporales de la intensidad del tráfico.....	25
3.1.1.2. Composición del tráfico.....	29
3.1.2.Velocidad.....	30
3.1.3.Densidad.....	31
3.1.4.Espaciamiento.....	31
3.1.5.Intervalo.....	32
3.1.6.Capacidad.....	32
3.1.7.Ecuación fundamental del tráfico.....	33
3.1.8.Relación velocidad – densidad.....	37
3.1.9.Relación intensidad – densidad.....	38
3.1.10.Relación intensidad – velocidad.....	39
3.2.MODELOS DE TRÁFICO.....	41
3.2.1.Modelos macroscópicos.....	41
Relación velocidad – densidad.....	42
3.2.2.Modelos Microscópicos.....	42
3.2.2.1.Modelos de seguimiento de vehículos.....	43
3.2.3.Modelos mesoscópicos.....	45
4.ASPECTOS MEDIO AMBIENTALES: CONTAMINANTES Y TECNOLOGÍAS.....	46
4.1.LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SUS FUENTES.....	47
4.1.1.Composición de la atmósfera.....	48
4.1.2. La Contaminación atmosférica.....	49
4.1.2.1.Definición de contaminación.....	49
4.1.2.2. Unidades de medida.....	50
4.1.2.3. Principios para el control.....	50
4.1.2.4. Contaminantes de la atmósfera.....	51

4.1.3. Los contaminantes del sector transporte.....	52
4.1.3.1. Compuestos orgánicos.....	52
4.1.3.2. Compuestos que contienen nitrógeno.....	54
4.1.3.3. Monóxido de carbono.....	56
4.2.CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS PROPULSORES DE LOS VEHÍCULOS AUTOMÓVILES.....	58
4.2.1.Motor Diésel.....	59
4.2.1.1.Principales contaminantes del motor Diésel y soluciones.....	60
4.2.2.El motor de gasolina.....	61
4.2.2.1.El catalizador de tres vías.....	61
4.2.3.Tecnologías alternativas.....	62
4.2.3.1. El motor híbrido.....	63
4.2.3.2. La célula de combustible.....	64
5.APLICACIONES INFORMÁTICAS.....	67
5.1.GETRAM.....	68
5.1.1.Aplicación TEDI.....	69
5.1.2.Aplicación AIMSUN.....	69
5.1.3. Aplicación AIMSUN 3D.....	70
5.2.AUTODESK 3D STUDIO MAX .....	71
6.MODELADO DE LA RED.....	72
6.1.DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA.....	75
6.2.INTERSECCIONES Y GIROS PERMITIDOS.....	77
6.2.1.Intersección 1.....	78
6.2.2.Intersección 2.....	81
6.2.3.Intersección 3.....	83
6.2.4.Intersección 4.....	84
6.2.5.Intersección 5.....	88
6.3.INTRODUCCIÓN A LOS CICLOS SEMAFÓRICOS.....	89
6.4.INTRODUCCIÓN A LOS AFOROS.....	94
6.5.INTRODUCCIÓN A LOS PASOS DE PEATONES.....	106
6.5.1.Modelado del cruce.....	107
6.5.2.Modelado de peatones. ....	110

6.6.LOS AUTOBUSES DE LA EMT.....	111
6.6.1.Itinerarios.....	111
6.6.2.Líneas problemáticas.....	114
6.6.3.Horarios.....	115
6.7.DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS BÁSICOS.....	117
6.7.1.Parámetros de la red.....	117
6.7.2.Parámetros de cada tipo de vehículo.....	119
6.8.COMBUSTIBLE Y EMISIONES. ....	124
6.8.1.Modelo de consumo de combustible.....	124
6.8.1.1.Parámetros de entrada.....	126
6.8.1.2. Salida.....	128
6.8.2.Modelo de emisión de contaminación.....	129
6.8.2.1. Parámetros de entrada.....	129
6.8.2.2.Salida.....	131
6.9.SIMULACIÓN.....	132
6.9.1.Simulación en dos dimensiones.....	132
6.9.1.1.Carga del escenario.....	133
6.9.1.2.Parámetros a definir dentro de simulador AIMSUN.....	136
6.9.2.Simulación 3D.....	137
6.9.2.1.Creación de figuras 3D.....	137
6.9.2.2. AIMSUN 3D.....	140
7.RESULTADOS Y VALIDACIÓN.....	142
7.1.VALIDACIÓN. ....	144
7.1.1.Datos para la validación.....	147
7.1.1.1. Semillas.....	153
7.2.RESULTADOS DEL MODELO: COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO .....	154
7.3.RESULTADOS DEL MODELO: ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES.....	159
7.3.1.Consumo de combustible.....	159
7.3.2.Emisión de contaminantes.....	163
8.ALTERNATIVAS.....	165
8.1.RESULTADOS DE LA ALTERNATIVA.....	172
8.2.RESULTADOS AMBIENTALES.....	177

***Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.***

---

8.2.1.Consumo de combustible.....	177
8.2.2.Emisión de contaminantes.....	181
9.CONCLUSIONES.....	186
10.ESTUDIOS FUTUROS.....	189
11.BIBLIOGRAFÍA.....	191
12.ANEXO I.....	194

## ÍNDICE DE FIGURAS.

Figura 1.1: Evolución del parque automovilístico en España (Fuente: Anuario Estadístico 2004. Ministerio de Fomento).....	14
Figura 1.2: Agotamiento de las reservas de petróleo mundial frente al aumento de la contaminación atmosférica. ( Fuente: Asociación para el Estudio de los Recursos Energéticos (AEREN)).....	15
Figura 3.1.1: Ciclo de la IMD.....	26
Figura 3.1.2: Ejemplo ciclo semanal de la intensidad.....	28
Figura 3.1.3: Ejemplo ciclo diario de la intensidad.....	29
Figura 3.1.4: Representación gráfica de la ecuación fundamental del tráfico.....	37
Figura 3.1.5: Relación entre velocidad y densidad.....	38
Figura 3.1.6: Relación entre la intensidad y la densidad.....	39
Figura 3.1.7: Relación entre intensidad y velocidad.....	40
Figura 3.2.1: Modelo de Greenshields.....	42
Figura 4.1.1: Gradiente térmico en la atmósfera.....	48
Figura 4.1.2: Esquema válvula EGR.....	56
Figura 4.2.1: Catalizador de 3 vías.....	61
Figura 4.2.2: Empleo de la tecnología híbrida en un automóvil (Fuente: Mercedes-Benz).....	64
Figura 4.2.3: Célula de combustible.....	65
Figura 4.2.4: Implantación de la célula de combustible en un vehículo actual (Fuente: General Motors).....	66
Figura 5.2.1: Ejemplo de modelos 3D desarrollados en 3D Studio.....	71
Figura 6.1.1: Imagen por satélite de la glorieta de las Pirámides.....	75
Figura 6.1.2: Plano de la glorieta de las Pirámides.....	76
Figura 6.2.1: Tramos rectos en el interior de la glorieta.....	77
Figura 6.2.2: Numeración de las intersecciones.....	78
Figura 6.2.3: Entrada por la M30 y salida por el paseo de las Acacias. ....	79
Figura 6.2.4: Entrada por la M30 y salida hacia la Intersección 2.....	79
Figura 6.2.5: Entrada por la M30 y salida por la Intersección 4.....	79
Figura 6.2.6: Entrada por el paseo de los Pinos y salida por el paseo de las Acacias.....	80
Figura 6.2.7: Entrada por el paseo de los Pinos y salida hacia la Intersección 2.....	80
Figura 6.2.8: Entrada por el paseo de las Yaserías y salida por el paseo de las Acacias.....	80

Figura 6.2.9: Entrada por el paseo de las Yaserías y salida hacia la intersección 2.....	80
Figura 6.2.10: Entrada por el paseo de las Yaserías y salida por la intersección 4.....	81
Figura 6.2.11: Movimiento desde la Intersección 1 hacia la calle de Toledo.....	81
Figura 6.2.12: Giro de continuación por la glorieta de las Pirámides desde la Intersección 1.....	82
Figura 6.2.13: Entrada por el paseo de las Acacias posible giro 1.....	83
Figura 6.2.14: Entrada por el paseo de las Acacias posible giro 2.....	83
Figura 6.2.15: Entrada por la calle de Toledo posible giro 1.....	83
Figura 6.2.16: Entrada por la calle de Toledo posible giro 2.....	83
Figura 6.2.17: Desde la Intersección 2 hacia la Intersección 4.....	84
Figura 6.2.18: Desde la Intersección 2 hacia el paseo Imperial.....	84
Figura 6.2.19: Entrada por el paseo Imperial y salida por la calle de Alejandro Dumas.....	85
Figura 6.2.20: Entrada por el paseo Imperial y salida por el paseo de los Pinos.....	85
Figura 6.2.21: Movimiento desde la Intersección 3 hacia la calle de Alejandro Dumas.....	86
Figura 6.2.22: Movimiento desde la Intersección 3 hacia el paseo de los Pinos.....	86
Figura 6.2.23: Movimiento desde la Intersección 1 hacia la calle de Alejandro Dumas.....	87
Figura 6.2.24: Entrada por el paseo de los Pinos y salida por la Intersección 1.....	88
Figura 6.2.25: Entrada por el paseo de los Pinos y salida por el paseo de las Yaserías.....	88
Figura 6.3.1: Primer grupo de señales de la Intersección 1.....	91
Figura 6.3.2: Segundo grupo de señales de la Intersección 1.....	92
Figura 6.3.3: Tercer grupo de señales de la Intersección 1.....	92
Figura 6.4.1: Intensidades horarias del total de los vehículos.....	96
Figura 6.4.2: Intensidades horarias de los vehículos ligeros.....	97
Figura 6.4.3: Intensidades horarias de los vehículos pesados.....	99
Figura 6.4.4: Intensidades horarias de los taxis.....	100
Figura 6.4.5: Intensidad horaria de los autocares.....	101
Figura 6.4.6: Intensidad horaria de las motos.....	103
Figura 6.4.7: Composición del tráfico en la glorieta de las Pirámides.....	104
Figura 6.4.8: Comparación de las intensidades horarias. Vehículos ligeros y totales.....	105
Figura 6.5.1: Numeración y localización de los pasos de peatones.....	106
Figura 6.5.2: Detalle de los carriles en los pasos de peatones.....	107
Figura 6.5.3: Detalle del ceda el paso en un paso de peatones.....	108
Figura 6.5.4: Colapso de la red debido a un mal modelado de los pasos de peatones.....	109

Figura 6.6.1: Itinerario línea 18 ida.....	112
Figura 6.6.2: Itinerario línea 18 vuelta.....	112
Figura 6.6.3: Itinerario líneas 23 y 35 ida.....	112
Figura 6.6.4: Itinerario líneas 23 y 35 vuelta.....	112
Figura 6.6.5: Itinerario líneas 34, 116, 118 y 119 ida.....	113
Figura 6.6.6: Itinerario líneas 34, 116, 118 y 119 vuelta.....	113
Figura 6.6.7: Itinerario líneas 36 y 62 ida.....	113
Figura 6.6.8: Itinerario líneas 36 y 62 vuelta.....	113
Figura 6.6.9: Autobús de la línea 18 obstaculizando el tráfico.....	114
Figura 6.6.10: Autobús de las líneas 18, 23 y 35 obstaculizando el tráfico.....	115
Figura 6.7.1: Parámetros de los vehículos ligeros.....	120
Figura 6.7.2: Parámetros de los autocares.....	120
Figura 6.7.3: Parámetros de las motos.....	121
Figura 6.7.4: Parámetros de los taxis.....	121
Figura 6.7.5: Parámetros de los vehículos pesados.....	122
Figura 6.7.6: Parámetros del autobús de la línea 34.....	123
Figura 6.7.7: Parámetros de los peatones.....	123
Figura 6.8.1: Pantalla de introducción de valores combustible en el editor TEDI.....	127
Figura 6.8.2: Emisión de contaminantes para vehículos ligeros.....	131
Figura 6.9.1: Pirámide 3DS.....	132
Figura 6.9.2: Vista de la glorieta en el simulador AIMSUN.....	134
Figura 6.9.3: Detalle de las luces semáforicas durante la simulación en dos dimensiones.....	135
Figura 6.9.4: Fuente 3DS.....	138
Figura 6.9.5: Entrada de metro 3DS.....	138
Figura 6.9.6: Parada de autobús 3DS.....	139
Figura 6.9.7: Glorieta en tres dimensiones.....	141
Figura 7.1.1: Resumen de pasos de la validación.....	145
Figura 7.1.2: Validación autocares.....	147
Figura 7.1.3: Validación taxis.....	148
Figura 7.1.4: Validación vehículos ligeros.....	149
Figura 7.1.5: Validación vehículos pesados.....	150
Figura 7.1.6: Validación motocicletas.....	151



Figura 7.1.7: Validación vehículos totales.....	152
Figura 7.1.8: Resultados de la simulación a partir de diferentes semillas.....	153
Figura 7.2.1: Cola media en las secciones de la glorieta modelada.....	154
Figura 7.2.2: Intensidad media en las secciones de la glorieta modelada.....	155
Figura 7.2.3: Intensidades horarias en la calle M30 y en el paseo de las Yaserías.....	157
Figura 7.2.4: Valor de la cola media en el acceso por la M30.....	158
Figura 7.2.5: Valor numérico de la cola media en el acceso por la M30.....	158
Figura 7.3.1: Gasto proporcional de combustible.....	160
Figura 7.3.2: Consumo de combustible total.....	161
Figura 7.3.3: Valores de consumo de combustible M30 y paseo de las Yaserías.....	162
Figura 7.3.4: Emisión de contaminantes por el total de los vehículos.....	163
Figura 7.3.5: Emisión total de NOx.....	164
Figura 7.3.6: Emisión total de HC.....	164
Figura 8.1: Salida por el paseo de los Pinos hacia la Intersección 1.....	167
Figura 8.2: Glorieta reformada.....	169
Figura 8.3: Ubicación de los semáforos en la reforma.....	170
Figura 8.4: Zona de transición saturada.....	171
Figura 8.1.1: Diferencias en el tamaño de colas tras la reforma.....	172
Figura 8.1.2: Cola media de los vehículos tras reforma.....	173
Figura 8.1.3: Comparación gráfica de la distribución horaria de intensidades de los 3 sistemas....	174
Figura 8.1.4: Comparación de las intensidades horarias de los 3 sistemas en los accesos por la M30 y por el paseo de las Yaserías.....	175
Figura 8.2.1: Distribución del gasto horario de combustible para los sistemas original y reformado. .....	178
Figura 8.2.2: Gasto de combustible en las secciones de entrada de la M30 y de la calle de las Yaserías. Sistemas original y reformado.....	179
Figura 8.2.3: Gasto de combustible en el acceso por la M30. Sist. Reformado.....	180
Figura 8.2.4: Gasto de combustible en el paseo de las Yaserías. Sist. Reformado.....	180
Figura 8.2.5: Emisión de CO en los sistemas original y reformado.....	182
Figura 8.2.6: Emisión de NOx en los sistemas original y reformado.....	182
Figura 8.2.7: Emisión de HC en los sistemas original y reformado.....	182
Figura 8.2.8: Emisión de CO en los accesos por la M30 y el paseo de las Yaserías. ....	183

***Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.***

---

Figura 8.2.9: Emisión de NOx en los accesos por la M30 y el paseo de las Yaserías. ....	184
Figura 8.2.10: Emisión de HC en los accesos por la M30 y el paseo de las Yaserías.....	184

## ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 4.1.1: Composición del aire troposférico.....	49
Tabla 6.3.1: Ciclos semafóricos.....	93
Tabla 6.4.1: Numeración de entradas y salidas.....	94
Tabla 6.4.2: Intensidades horarias del total de los vehículos.....	95
Tabla 6.4.3: Intensidades horarias de los vehículos ligeros.....	97
Tabla 6.4.4: Intensidades horarias de los vehículos pesados.....	98
Tabla 6.4.5: Intensidades horarias de los taxis.....	100
Tabla 6.4.6: Intensidades horarias de los autocares.....	101
Tabla 6.4.7: Intensidades horarias de las motos.....	103
Tabla 6.4.8: Aforos de peatones.....	105
Tabla 6.5.1: Número de carriles asignados a cada paso de peatones.....	110
Tabla 6.6.1: Intervalos de llegada para los autobuses de la EMT.....	116
Tabla 6.8.1: Obtención del gasto de combustible.....	126
Tabla 6.8.2: Valores del consumo de combustible para cada tipo de vehículo.....	127
Tabla 6.8.3: Valores de emisiones para vehículos ligeros y taxis.....	130
Tabla 6.8.4: Valores emisiones para vehículos pesados, autobuses y autocares.....	130
Tabla 7.1.1: Validación autocares.....	147
Tabla 7.1.2: Validación taxis.....	148
Tabla 7.1.3: Validación vehículos ligeros.....	149
Tabla 7.1.4: Validación vehículos pesados.....	150
Tabla 7.1.5: Validación motocicletas.....	151
Tabla 7.1.6: Validación vehículos totales.....	152
Tabla 7.2.1: Resultados de aforos en los accesos.....	155
Tabla 7.3.1: Valor del gasto de combustible en la glorieta completa.....	159
Tabla 7.3.2: Valores de consumo de combustible en la calle M30 y en el paseo de las Yaserías.....	161
Tabla 7.3.3: Resultados numéricos de la emisión de contaminantes.....	164
Tabla 8.1: Comparación ciclos de semáforo inicial frente a la primera alternativa.....	167
Tabla 8.2: Ciclo semafórico de la reforma.....	170
Tabla 8.1.1: Resultados de cada intervalo horario en la glorieta reformada.....	173
Tabla 8.1.2: Datos numéricos de los aforos en los accesos por la M30 y calle de las Yaserías para	

los 3 sistemas.....	176
Tabla 8.2.1: Comparación del gasto de combustible del sistema modelado original frente al sistema reformado.....	177
Tabla 8.2.2: Gasto de combustible en los accesos por la M30 y el paseo de las Yaserías. Sistemas original y reformado.....	180
Tabla 8.2.3: Emisión de contaminantes del sistema reformado.....	181
Tabla 8.2.4: Comparación de emisiones, sistemas original y reformado.....	181
Tabla 8.2.5: Emisión de contaminantes en los sistemas original y reformado. Accesos por la M30 y el paseo de las Yaserías.....	184
Tabla 8.2.6: Comparación de emisiones de los sistemas original y reformado. Accesos por la M30 y el paseo de las Yaserías.....	184

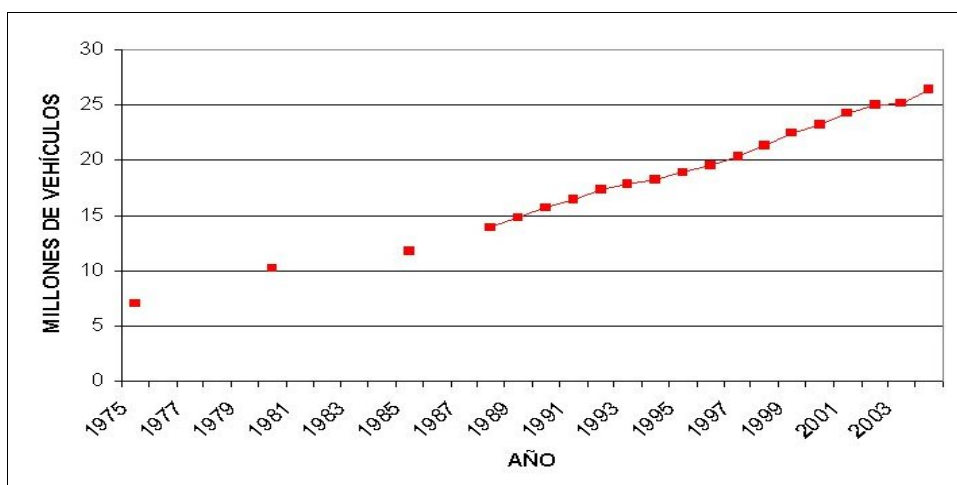
# 1.INTRODUCCIÓN.

Para el hombre los desplazamientos de un lugar a otro han sido, y son, una necesidad. Es algo unido al ser humano, desde el hombre prehistórico en busca de alimentos, hasta la actualidad para ir al trabajo, al colegio, y para todo el resto de tareas que no se realizan cercana del hogar. A lo largo de este tiempo el medio de locomoción ha ido variando, caminar, montar a caballo, en carros, barcos de vela... y más recientemente con el desarrollo de la revolución industrial se abrió todo un abanico de nuevas formas de desplazarse, que aún en nuestros días sigue evolucionando y ampliándose.

También las vías y las formas de conducir han sufrido importantes modificaciones. Empezando por los caminos polvorientos creados por el simple ir y venir de los viandantes, pasando por las calzadas romanas hasta llegar a los cientos de miles de kilómetros de carreteras construidos y que día a día siguen aumentando. El transporte, de personas o mercancías, es una necesidad además de un hábito y un estilo de vida que no se puede negar.

Al comienzo de los tiempos, este **tráfico** de personas no resultaba un problema, todas las personas se desplazaban, al igual que hoy, pero lo solían hacer andando y las agrupaciones de personas eran de cientos de personas o de miles en los mayores grupos, por lo que el número y la distancia recorrida era pequeño. Sin embargo, con el crecimiento humano, estas agrupaciones fueron aumentando y de miles de personas se pasaron a millones. En los periodos en los que las agrupaciones eran pequeñas y el espacio no era un recurso limitado dentro de las ciudades, los transeúntes viajaban sin ningún control entre las calles, aunque estrechas, el flujo de personas no era suficiente para llenarlas. Pero cuando las casas comenzaron a tener varias alturas y no era una única familia la que vivía en cada una de ellas si no varias, la densidad de población aumento, y con ello

el flujo de gente y vehículos en las calles. Para mostrar este crecimiento, en la figura 1.1 se puede ver el aumento del parque automovilístico en España desde mediados de la década de 1970.

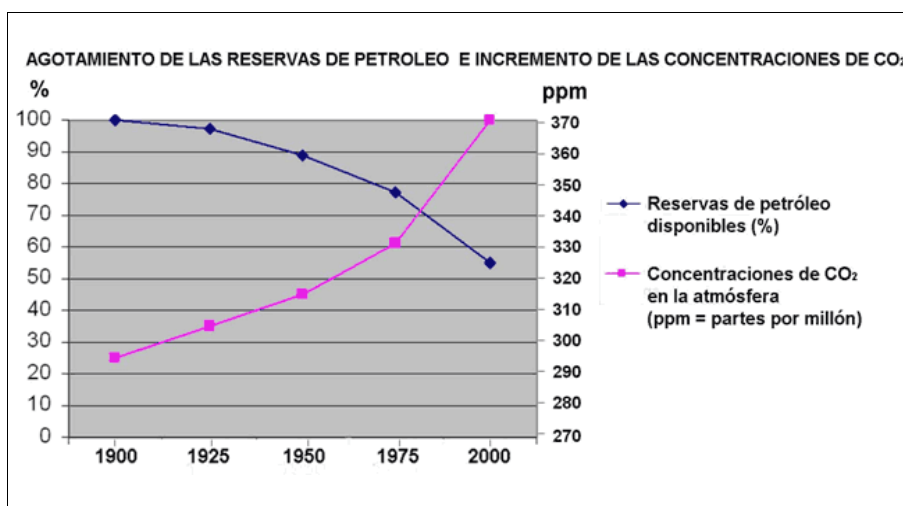


*Figura 1.1: Evolución del parque automovilístico en España (Fuente: Anuario Estadístico 2004. Ministerio de Fomento).*

Por si esto fuera poco, los vehículos también aumentaron de tamaño pasando de la envergadura de una persona, o un caballo o algún carro, a las dimensiones de coches, pero también de furgonetas, autobuses y camiones, mucho mayores que los anteriores. Incluso hoy en día algunas ciudades modernas restringen el paso de los vehículos más pesados por su interior, como la ciudad de Madrid, por ejemplo. La suma de estos dos factores obligó al ser humano a desarrollar toda una nueva disciplina sobre la ordenación y gestión del tráfico en las ciudades.

El aumento del tráfico produce otros problemas además de los exclusivamente funcionales. La inmensa mayoría de los vehículos actuales son de combustión interna, que es a día de hoy la tecnología predominante. Esto hace que los desplazamientos de este tipo de vehículos genere contaminación ambiental, a la que se suman las contaminaciones lumínicas y sonoras. Pero no sólo es lo que producen, si no también lo que gastan, combustible.

Estas dos consecuencias del tráfico tienen que ser estudiadas con detalle. La contaminación ambiental, de manera genérica, produce cambios en el entorno y, concretamente, puede producir enfermedades e incluso la muerte en el ser humano y los seres vivos. El combustible, por su parte, es un recurso limitado y sus fuentes actuales no son inagotables. En la figura 1.2 está representado el aumento de la contaminación atmosférica, en este caso medido como la concentración de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera, frente al descenso porcentual de las reservas de petróleo, fuente principal de los combustibles actuales.



*Figura 1.2: Agotamiento de las reservas de petróleo mundial frente al aumento de la contaminación atmosférica. ( Fuente: Asociación para el Estudio de los Recursos Energéticos (AEREN)).*

A la vista de estos datos, es necesario que se le preste atención al sector del transporte, no sólo desde el punto de vista más directo, si no también, desde una perspectiva más global considerando los recursos que consume y los deshechos que emite.



## **2. OBJETIVOS.**

Con el presente proyecto se va demostrar que con pequeñas acciones, como una gestión más eficiente del tráfico urbano, es posible mejorar no solo el tráfico, si no consumir menos recursos, ahorrar tiempo en los desplazamientos y disminuir las emisiones.

Para llevar a cabo este proyecto se va a utilizar una herramienta informática, cuyo nombre comercial es AIMSUN. Este programa es un simulador de tráfico que permite, además de obtener y variar parámetros típicos del tráfico, calcular aspectos medioambientales como el consumo de combustible o las emisiones de diferentes tipos de contaminantes.

La zona elegida para llevar a cabo este estudio es la madrileña glorieta de las Pirámides que se encuentra muy cerca de la carretera de circunvalación M30 y que por ello registra un tráfico diario importante. Esta glorieta fue reformada tras el soterramiento de la M30, dotándola de una salida directa de esta carretera. Esta primera reforma creaba ciertos problemas y el Excelentísimo Ayuntamiento de Madrid decidió realizar una segunda reforma. Este proyecto estudiará si la última reforma fue positiva y se intentará cuantificarla numéricamente respecto a su antecesora. Para ello se perseguirán los siguientes objetivos:

- Definición y análisis de las principales variables del tráfico, así como de las relaciones entre ellas para un caso práctico de tráfico real.
- Definición y análisis de los principales contaminantes del sector del transporte, así como la influencia del tráfico sobre ellos y algunas posibles tecnologías futuras.
- Análisis del consumo de combustible y emisión de los principales contaminantes en vías urbanas, buscando cuando y en que momentos se produce un mayor consumo de combustible.
- Aprendizaje del uso del simulador de tráfico GETRAM, en especial, las herramientas para el cálculo de parámetros ambientales, el gasto de combustible y la emisión de contaminantes.

### ***Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.***

---

- Modelar los pasos para peatones de la mejor manera posible, valiéndose para ello de las herramientas que GETRAM ofrece para los vehículos motorizados.
- Realizar una introducción al diseño 3D para la creación de figuras tridimensionales que GETRAM utiliza.
- Estudio de la influencia del diseño viario en un caso práctico.
- Estudio sobre el comportamiento anterior y posterior de los parámetros del tráfico y aspectos ambientales de la glorieta de las Pirámides tras su reformada por el Excelentísimo Ayuntamiento de Madrid.

Debido a la consecución de estos objetivos, será posible la elaboración de un documento que explique objetivamente las mejoras producidas por el diseño actual frente al previo.

### **3. INGENIERÍA DE TRÁFICO.**

La invención del vehículo puede considerarse reciente, en comparación al desarrollo de la civilización. No obstante, es evidente que en sus aproximadamente cien años de existencia, el vehículo ha ido adquiriendo una importancia cada vez mayor, tanto para la economía del transporte, como para la vida cotidiana del ser humano.[1-3]

La importancia adquirida requirió en años anteriores que se le diera una atención preferente a los programas de construcción de calles y carreteras, resaltando sobre todo el aspecto estructural de las mismas. Sin embargo, con el transcurso del tiempo, se verificó también un crecimiento paulatino de los problemas de tráfico, induciendo a los técnicos al estudio de otro aspecto del sistema de transporte: el operacional.

La severidad de algunos de los problemas originados se refleja de forma directa en el incremento desmesurado de los tiempos de viaje, de los costos de operación y de la contaminación atmosférica y acústica de las ciudades, aspectos que, en general, denotan el deterioro progresivo de la calidad de vida de la población.

Recientemente, se ha establecido que las soluciones a los problemas antes mencionados deben pasar por la aplicación de una nueva especialización de la Ingeniería, denominada Ingeniería de Tráfico, la misma que concierne específicamente al aspecto funcional de la vialidad, la que tiene que ver con el movimiento de vehículos motorizados y de peatones.

El ingeniero formado en esta nueva disciplina es el principal responsable de recolectar información, analizar los datos obtenidos y buscar la solución de los problemas de tráfico. Es el

### *Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.*

encargado de solucionar los problemas originados por la operación, por encima de su capacidad, de los sistemas de transporte y también de resolver los problemas físicos y de seguridad de las vías, proponiendo cuando corresponda, mejoras a la reglamentación del sistema de transporte existente.

En síntesis, el objetivo de esta nueva rama de la Ingeniería es el de mejorar la eficiencia económica del transporte y la seguridad de todos los usuarios de la vía.

Las principales líneas de trabajo de los ingenieros de tráfico son:

- Planificación de tráfico y transporte.
- Señalización y regulación semafórica.
- Dirección e ingeniería de tráfico.
- **Evaluación y asesoramiento del impacto de tráfico.**
- **Simulación y modelado de transporte.**
- Planes de transporte público.
- Planificación de eventos especiales.
- Política y planificación de aparcamientos.
- Proyectos de peatonalización y ciclorutas.
- Sistemas de transporte inteligentes (ITS).

- Seguridad vial.
- Análisis financiero y económico de transporte.
- Planeación de puertos.
- Encuestas e investigación de transporte.
- Consultas a la población.

Cada vez es más común el uso de nuevas tecnologías y técnicas de estudio por parte de instituciones y empresas del sector, tanto para el diseño de una nueva vía como de la reforma de las ya existentes. Aplicaciones informáticas como la herramienta AIMSUN se hacen cada día más imprescindibles y necesarias.

Para abordar de manera efectiva el campo de estudio de la ingeniería de tráfico, se hace necesario introducir una serie de parámetros básicos que se presentan en el siguiente apartado.

## 3.1. PARÁMETROS FUNDAMENTALES DEL TRÁFICO.

Para la descripción de los estados de circulación de cualquier infraestructura viaria se utilizan tres parámetros para definirla, estos son: la intensidad, la velocidad y la densidad.

Además de estas variables fundamentales habrá que estudiar las relaciones entre ellas, así como otras variables que dan información adicional sobre la vía, como pueden ser la capacidad, el intervalo o la distancia entre vehículos.

### 3.1.1. Intensidad.

Se llama intensidad del tráfico al número de vehículos que pasan a través de una sección fija de una vía por unidad de tiempo.

$$I = \frac{n(x)}{t}$$

Siendo:

$n(x)$  igual al número de vehículos que atraviesan la sección fija de la vía.

$t$  es igual al intervalo temporal estudiado.

Las unidades más usadas son vehículos por hora (veh/h) y vehículos por día (veh/día). Si se emplea la unidad de vehículos por hora, se habla de intensidad horaria. Del mismo modo, si se utiliza la unidad de vehículos por día se habla de intensidad diaria.

La intensidad es la característica más importante de la circulación vial ya que el resto de variables pueden relacionarse fácilmente con ella. Proporciona una descripción intuitiva del comportamiento del tráfico y además, ha sido y es la variable más utilizada en la ingeniería del tráfico, por lo que existen un gran número de estudios y datos sobre la misma.



Desde el punto de vista de la ingeniería del tráfico, existen dos conceptos relacionados con la intensidad que resultan especialmente importantes :

–La intensidad media diaria: conocida en España por las siglas IMD, es el número de vehículos que pasan por una sección durante un año dividido entre el número total de días, 365. La IMD, se utiliza para fines muy variados como pueden ser la clasificación de vías, cálculos de índices de accidentes, proyectos de señalización e iluminación, para programas de mejora o incluso para estudios económicos.

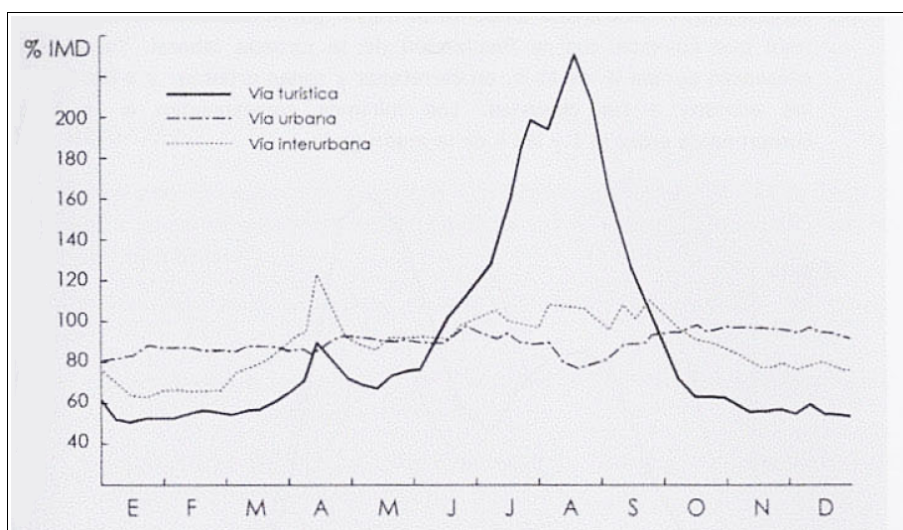
–La intensidad horaria punta: es el número de vehículos que pasan por una sección en el transcurso de una hora cuando las condiciones son de máxima circulación. La intensidad horaria es más interesante desde el punto de vista del proyecto y la ordenación: la capacidad de las vías, características de las intersecciones y giros, control de tráfico y coordinación de semáforos.

Para medir la intensidad se realizan aforos en secciones de la carretera donde resulte especialmente interesante contar con estos datos, normalmente las entradas y salidas a grandes intersecciones, o calles con mucho tráfico. Esta tarea consiste en contar el número de vehículos que atraviesan una determinada sección de la vía, bien de manera manual, automáticamente (utilizando aparatos contadores) o bien electrónicamente (a través de espiras y captosres). Recientemente con el desarrollo de la visión por computador también es posible realizar esta tarea con tratamiento de imágenes. Estos aforos se realizan durante periodos de tiempo de diferente longitud, y así se obtiene un registro de los valores de la intensidad para cada periodo.

### **3.1.1.1 Ciclos temporales de la intensidad del tráfico.**

La intensidad del tráfico varía a lo largo del tiempo y está sometida en muchos casos a variaciones aleatorias difíciles de controlar. Sin embargo, la intensidad sufre ciertas variaciones cíclicas que se repiten a lo largo del tiempo y que en muchas ocasiones se pueden prever. Las variaciones cíclicas más comunes son el ciclo de intensidad diario, el ciclo de intensidad semanal y el ciclo de intensidad anual.

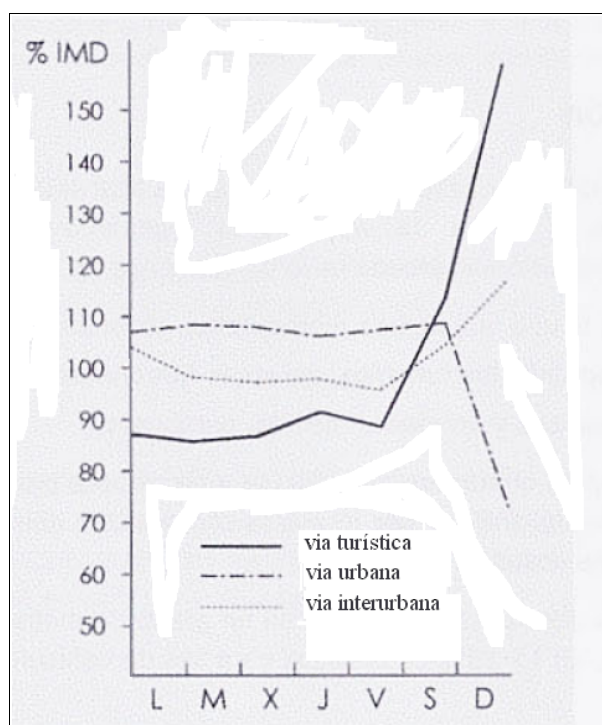
- Ciclo anual: del estudio del gráfico Intensidad-tiempo adjunto ( figura 3.1.1), se deduce que durante la época estival (meses de julio y sobre todo agosto) en las zonas turísticas aumenta el número de vehículos, en detrimento de las zonas urbanas interiores. También se refleja un pico significativo, aunque de menor importancia, en el mes de abril, coincidiendo, normalmente, con las vacaciones de Semana Santa. En los meses de invierno, la intensidad cae hasta sus mínimas cotas.



*Figura 3.1.1: Ciclo de la IMD.*

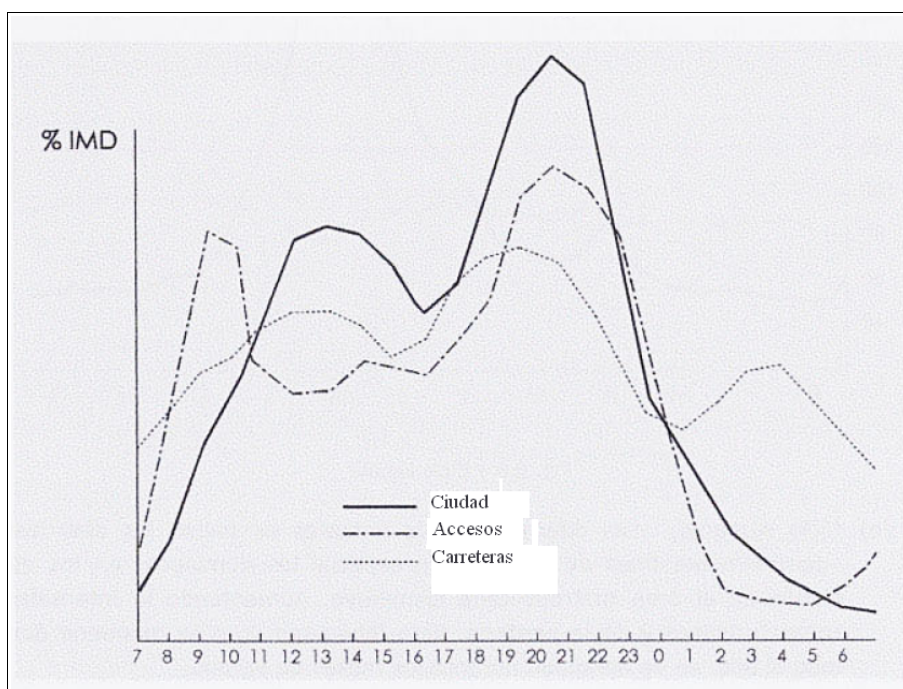
- Ciclo semanal: Las diferencias más notables se dan durante los días festivos, fines de semana, y en especial los domingos; en los que el tráfico en el área metropolitana disminuye, aumentando la intensidad en zonas turísticas y de la periferia. Este ciclo semanal que se mantiene durante todo el año, siendo las diferencias máximas entre los días con mayor y menor IMD durante los meses de verano. En la figura 3.1.2, se puede ver un gráfico representativo de este ciclo.





*Figura 3.1.2: Ejemplo ciclo semanal de la intensidad.*

- Ciclo diario: La intensidad horaria suele seguir un patrón que se repite de forma aproximada cada día. En el gráfico de la figura 3.1.3, puede verse un ejemplo en el que el ciclo diario presenta su mayor punta entre las 20 y 21 horas, hora que coincide con la finalización de la jornada laboral. También suele presentar dos máximos a las una de la tarde, en carreteras y zonas urbanas, y a las 9 de la noche en los accesos a las ciudades. Los mínimos corresponden a la franja comprendida entre la 1 y las 5h de la madrugada.



*Figura 3.1.3: Ejemplo ciclo diario de la intensidad.*

### **3.1.1.2 Composición del tráfico.**

Además de conocer el número total de vehículos que pasan por una carretera, suele ser interesante conocer qué tipo de vehículos circulan por ésta. Por ello, al realizar los aforos se clasifican los vehículos registrados en varias categorías, por ejemplo:

- Motocicletas,
- vehículos ligeros,
- vehículos pesados,
- autobuses y
- transporte público.

### 3.1.2. Velocidad.

De las variables fundamentales del tráfico, la velocidad es la más de difícil de determinar. La velocidad en un tramo de vía varía mucho de unos vehículos a otros, pero incluso para un mismo vehículo ésta no permanece constante. Para resolver este inconveniente existen diferentes definiciones de la variable velocidad. Así pues algunas de las velocidades más usadas son las siguientes:

- Para un solo vehículo
  1. Velocidad instantánea, es la velocidad del vehículo al atravesar una determinada sección de vía.
  2. Velocidad de circulación, es el cociente entre la distancia recorrida y el tiempo que el vehículo ha estado en **movimiento** para recorrerla.
  3. Velocidad de recorrido, el cociente entre la distancia recorrida y el tiempo total en recorrerla, incluyendo el tiempo de las posibles paradas.
- Velocidad para un grupo de vehículos
  1. Velocidad media instantánea, es el promedio de las velocidades instantáneas de cada vehículo por separado que atraviesan un determinado tramo de vía. Puede ser local o espacial dependiendo del método de selección de la muestra de vehículos.
  2. Velocidad media en un tramo, se calcula como el cociente entre la longitud de un tramo y la media de los tiempos empleados por los vehículos en recorrerlo.
  3. Velocidad media en movimiento, similar a la definición anterior pero sin contar los tiempos de parada de los vehículos.
  4. Velocidad percentil 85, se define como aquella velocidad que sólo es rebasada por el 15% de los vehículos. Para este cálculo se considera únicamente los turismos, dado que son los más rápidos y abundantes. Esta velocidad suele ser en torno al 20% superior a la velocidad media.
- Velocidad de proyecto, es aquella que se utiliza como base para el cálculo de los elementos geométricos de la vía: radios de curvas, peralte y distancias de visibilidad. Se emplea a la hora de construir y diseñar la carretera.
- Velocidad de servicio, es aquella velocidad que con una situación atmosférica favorable y con las condiciones de circulación existentes en cada momento, se puede circular dentro de unos márgenes razonables de seguridad.

### **3.1.3. Densidad.**

Se entiende por densidad de tráfico al número de vehículos que ocupan un tramo de carretera de longitud dada para un instante de tiempo determinado, habitualmente se mide en vehículos por kilómetro. Es difícil medir la densidad de manera experimental dado que se necesita un punto elevado desde donde poder fotografiar el tramo a considerar. Sin embargo, se puede calcular a través de la velocidad media de recorrido y de la intensidad, que habitualmente son más sencillas de medir. Las tres variables se relacionan mediante la expresión:

$$I = D \cdot V$$

Donde  $I$  es la intensidad,  $D$  la densidad y  $V$  la velocidad media.

La densidad es un parámetro crítico en la descripción de las operaciones de tráfico. Describe la proximidad entre los vehículos y refleja la libertad de maniobra dentro de la corriente de tráfico. El valor máximo de la intensidad tiene lugar cuando todos los vehículos están en fila sin huecos y depende de la medida de los vehículos y del número de carriles de la vía si se quiere conocer la densidad total de la vía.

### **3.1.4. Espaciamiento.**

Se define el espaciamiento entre vehículos como la distancia entre las partes de frontales de dos vehículos consecutivos en un mismo carril. El valor medio del espaciamiento coincide con la inversa de la densidad.

$$s_m = \frac{1}{D}$$

Donde  $s_m$  es el espaciamiento medio y  $D$  la densidad.

Para una determinada velocidad, puede definirse un espaciamiento medio mínimo que garantice la seguridad del tráfico. En general, existen varios métodos para el cálculo de esta distancia en el que se tiene en cuenta además de la velocidad, la longitud media de los vehículos, el tiempo de reacción y la distancia de frenado.



### **3.1.5. Intervalo.**

Se conoce como intervalo al tiempo transcurrido entre el paso de dos vehículos consecutivos a través de una sección fija de carretera. Se puede demostrar que el valor medio del intervalo de una vía coincide con la inversa de la intensidad.

$$h = \frac{1}{I}$$

Donde  $h$  es el intervalo, e  $I$  la intensidad.

### **3.1.6. Capacidad.**

Se entiende por capacidad de una sección de carretera, al número máximo de vehículos que pueden pasar por dicha sección por unidad de tiempo. De acuerdo con esta definición, la capacidad de una vía siempre ha de ser igual o mayor que su intensidad. Suponiendo una velocidad uniforme, la capacidad puede expresarse como:

$$C = 1000 \cdot \frac{V}{s_s}$$

Siendo  $V$  la velocidad en km/h y  $s_s$  la separación mínima entre vehículos.

En algunos casos, los valores obtenidos de capacidad aplicando la fórmula anterior, resultan ser demasiado altos, por lo que resultan de mayor interés los datos de capacidad obtenidos a través de observaciones empíricas, y análisis de datos reales.

### **3.1.7. Ecuación fundamental del tráfico.**

La ecuación que relaciona las variables intensidad, velocidad y densidad se conoce como ecuación fundamental del tráfico.

Suponiendo que dos vehículos se desplazan a una velocidad media  $V_t$  separados por una distancia  $s$ . En este caso el intervalo,  $\tau$ , entre ambos vehículos no es más que:

$$\tau = \frac{s}{V_t}$$

De esta relación y de las definiciones de intervalo y espaciamiento se tiene:





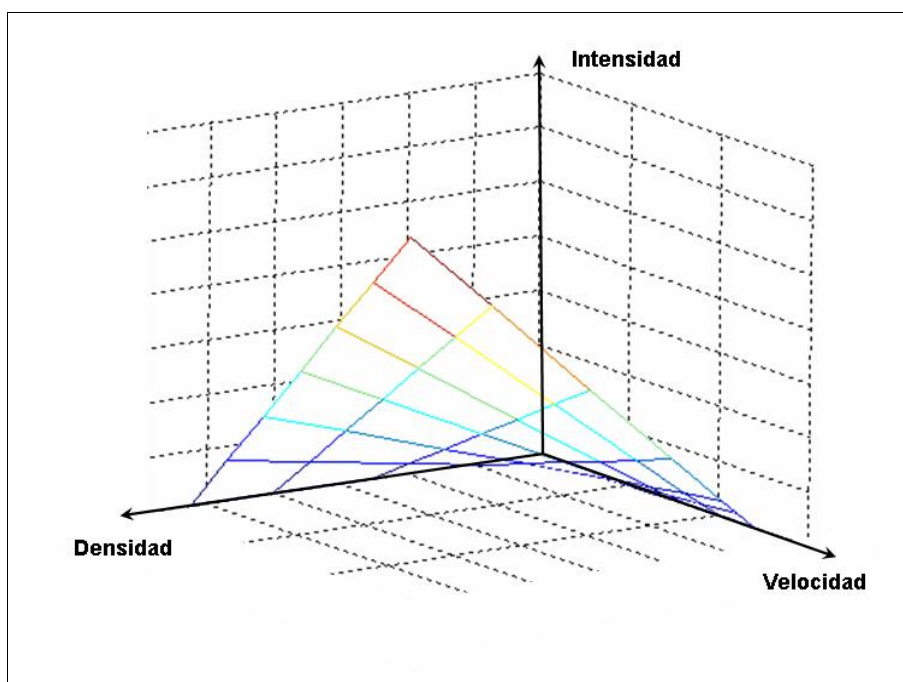
$$\left. \begin{array}{l} \tau = \frac{s}{V_t} \\ s = \frac{1}{D} \\ \tau = \frac{1}{I} \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{1}{I} = \frac{1}{D \cdot V_t} \Rightarrow I = D \cdot V_t$$

Si el tráfico fuese homogéneo, el razonamiento anterior sería suficiente para establecer la relación entre las tres variables fundamentales. Pero la realidad es que las variables de intensidad, velocidad y densidad, varían con el tiempo y el espacio de forma aleatoria.

Desde este punto de vista la obtención de la ecuación requiere un razonamiento más riguroso, considerando la intensidad, la velocidad y la densidad como variables aleatorias discretas o continuas. Dicha ecuación implica que la circulación en un tramo de carretera en un momento dado queda perfectamente descrita por los tres valores de intensidad, velocidad y densidad.

#### Interpretación de la Ecuación Fundamental del Tráfico.

La ecuación fundamental enlaza las tres variables básicas del tráfico vial, de forma que la circulación en un tramo de carretera en un momento dado queda perfectamente descrita por tres valores (intensidad, velocidad y densidad). La representación gráfica de esta ecuación es una curva tridimensional como la que se muestra en la figura 3.1.4.



*Figura 3.1.4: Representación gráfica de la ecuación fundamental del tráfico.*

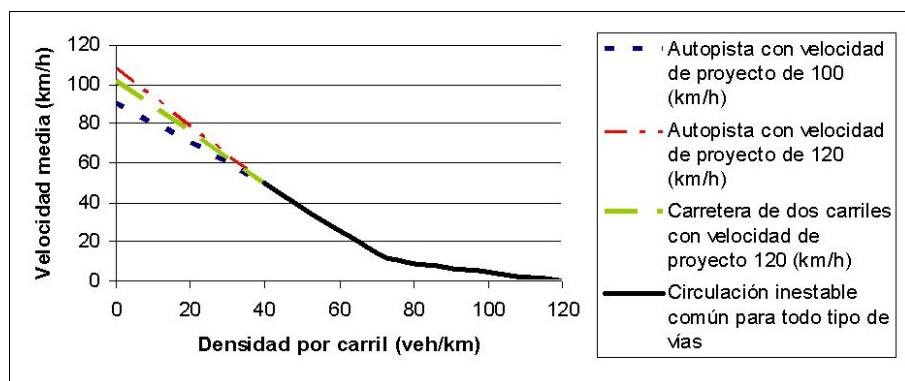
En la práctica, es más habitual trabajar con las proyecciones de dicha curva sobre los ejes coordenados.

### **3.1.8. Relación velocidad – densidad.**

Es fácil ver que cuando hay pocos vehículos sobre una vía, lo que quiere decir que la densidad es pequeña, los vehículos pueden circular a la velocidad que quieren, pudiendo ser la más alta que se permita atendiendo al tipo de vehículo, la vía y las condiciones meteorológicas. Si por el contrario, la carretera estuviera llena de vehículos la velocidad de cada vehículo se vería muy afectada por el resto de vehículos, especialmente por los más lentos.

La velocidad media resulta ser una función de la densidad que alcanza un valor máximo cuando esta es casi cero y disminuye constantemente al aumentar dicha densidad hasta llegar a anularse cuando se alcanza el valor máximo de densidad.

Esta función varía de unas carreteras a otras, siendo más influyente el tipo de vía cuando la densidad es baja, ya que en estas condiciones apenas influyen el resto de vehículos. Sin embargo, cuando la densidad es alta, el factor principal es el resto de vehículos, ya que no es posible alcanzar la velocidad óptima de la vía al circular vehículos más lentos que interfieren con el resto. En la figura 3.1.5 se muestra el aspecto característico que suele tener de esta relación.



*Figura 3.1.5: Relación entre velocidad y densidad.*

### **3.1.9. Relación intensidad – densidad.**

Partiendo de la relación fundamental entre densidad, intensidad y velocidad  $I = V \cdot D$ , es posible deducir la relación entre intensidad y densidad. Se puede observar que si la densidad es nula, la intensidad también lo será, así pues, la intensidad se anulará en dos casos:

- Cuando la densidad es cero, y por tanto no existen vehículos en la calzada

- La intensidad también sería cero si existiesen tantos vehículos en la calzada que éstos estuviesen completamente detenidos. En este caso, la velocidad media sería cero y la densidad sería máxima.

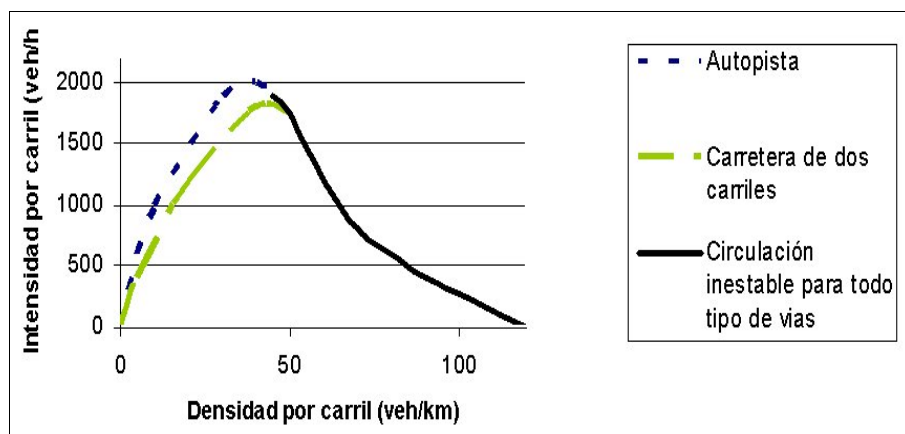
Por tanto, existen dos valores para los cuales la intensidad es nula y que coinciden con los puntos de máxima y mínima densidad. La intensidad, por definición, tiene que ser positiva y no constante, así que debe existir un punto de máxima intensidad entre la densidad nula y la densidad máxima. Dicho valor se conoce como densidad crítica, suele estar entre el 30 y el 40% de la densidad máxima, y coincide con el valor de capacidad de la vía. (Figura 3.1.5)

A la izquierda de dicho valor, la circulación es fluida y estable, y en caso de producirse alguna pequeña perturbación la densidad tiende a volver al estado anterior. Por el contrario, a la derecha del punto de densidad crítica, las perturbaciones tienden a producir un empeoramiento de la situación siendo el estado límite la detención total del tráfico.

Este razonamiento explica por qué a pesar de que la densidad es mayor en este lado de la curva, la intensidad de los vehículos decrece.

El diagrama que representa la intensidad en función de la densidad, se conoce como Diagrama

Fundamental del Tráfico. En él puede obtenerse para cualquier punto de la curva, la intensidad ,eje de ordenadas; la densidad, eje de abscisas; y la velocidad, pendiente de la recta que une el origen con el punto de estudio.(Figura 3.1.6)



*Figura 3.1.6: Relación entre la intensidad y la densidad.*

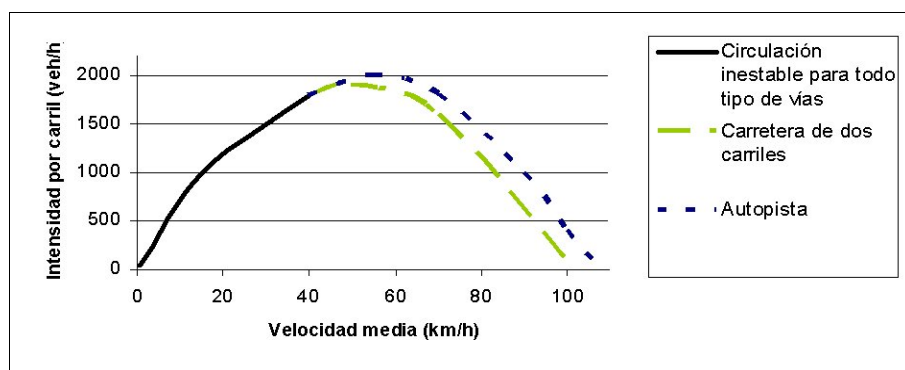
### 3.1.10. Relación intensidad – velocidad.

Habitualmente se intenta deducir las condiciones de tráfico a partir del conocimiento de la demanda de tráfico. Esto hace que la relación velocidad – intensidad tenga una importancia práctica mayor que el resto, ya que la velocidad puede definir una condición del tráfico y la intensidad una demanda.

Se suelen utilizar estas dos magnitudes en la práctica por ser más sencillas de medir que la densidad y por tanto, la relación intensidad – velocidad, la más fácil de obtener. Se han realizado numerosos estudios para determinar la capacidad de las carreteras, que es un parámetro importante, a la hora de definir la velocidad máxima o saturación de la vía.

Si se representa la intensidad por carril en función de la velocidad media, se obtiene la gráfica que aparece en la figura 3.1.7, donde se muestran diferentes curvas en función del tipo de carretera.





*Figura 3.1.7: Relación entre intensidad y velocidad.*

## **3.2. MODELOS DE TRÁFICO.**

La ingeniería de tráfico, al igual que cualquier otra ciencia, pretende construir modelos que alcancen un máximo de realidad. En el caso de modelos de tráfico pueden dividirse en tres tipos:

- Modelos macroscópicos: se centran en captar las relaciones globales del flujo del tráfico, como la velocidad de los vehículos, la densidad de tráfico y el flujo vehicular. Son modelos continuos basados en el empleo de ecuaciones diferenciales, como en el caso de modelos de gases cinéticos y modelos hidrodinámicos.

Dentro de los modelos macroscópicos existen modelos puramente empíricos, denominados modelos de capacidad y nivel de servicio, que renuncian al planteamiento de las ecuaciones diferenciales y se limitan a establecer relaciones empíricas entre las principales variables bajo el control del diseñador.

- Modelos microscópicos: enfocados a la descripción del comportamiento del flujo del tráfico vehicular a través de la descripción de las entidades discretas individuales y atómicas que interactúan unas con otras (en este caso cada vehículo individualmente). Son modelos por lo general discretos.

- Modelos mesoscópicos: definen una función que expresa la probabilidad de que un vehículo a determinada velocidad se encuentre en un cierto tiempo en determinada posición. Utilizan por lo general métodos de la mecánica estadística.

### **3.2.1. Modelos macroscópicos.**

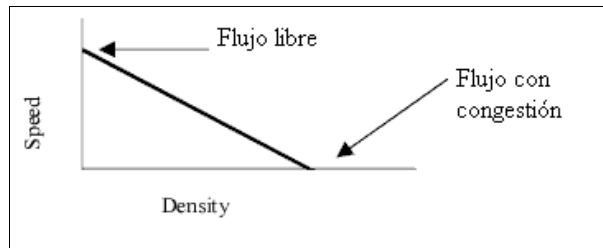
En este tipo de modelos, en lugar de considerar el tráfico como un conjunto de vehículos individuales, se interpreta como un flujo continuo de la materia.

Existen distintos tipos de modelos macroscópicos según las relaciones entre los principales parámetros del tráfico. Los modelos del tráfico más sencillos se centran solamente en la relación entre dos variables con el fin de alcanzar una mayor simplificación.

## Relación velocidad – densidad.

- Modelo de Greenshields

Es el primer modelo de tráfico utilizado, desde el año 1931. Indica que si el tráfico es continuo existe una relación lineal entre la velocidad y la densidad, como aparece en la figura 3.2.1.



*Figura 3.2.1: Modelo de Greenshields*

- Modelo de Greenberg

A partir del anterior, en 1959 se creó este modelo en el que la variación sigue una ley logarítmica. Este modelo ha resultado ser especialmente útil para medir tráfico pesado.

- Modelo de Underwood

También se trata de un modelo exponencial logarítmico pero se ajusta mejor al tráfico ligero.

- Modelo de Eddie

Consiste en una combinación de los modelos de Greenberg y Underwood. Este modelo se emplea para zonas de baja densidad de tráfico y el de Greenberg para altas.

## 3.2.2. Modelos Microscópicos

El modelado microscópico analiza el comportamiento individual de cada vehículo y conductor, de manera que, integrando los datos de cada vehículo, se puede obtener información del tráfico viario en su totalidad.

Estos modelos, dada su naturaleza, no consideran el tráfico de manera global, sino que analiza cada caso de manera particular, haciendo que se puedan evaluar los distintos casos según el tipo de vehículos que se estén estudiando (ligeros, pesados, motos peatones..).

Los modelos microscópicos tienen algunas limitaciones, ya que cada conductor puede reaccionar de distintas maneras en función de su edad, experiencia, vehículo, condiciones meteorológicas, estado de ánimo, etc. Y esta variabilidad resulta difícil de considerar en los modelos.

### **3.2.2.1 Modelos de seguimiento de vehículos.**

Estos modelos se desarrollan con el objeto de analizar la influencia que ejerce un determinado vehículo en el vehículo que le sigue. Si el vehículo predecesor modifica su velocidad afectará al resto del tráfico. Los modelos de seguimiento de vehículos consideran vías de un único carril en las que no se permite el adelantamiento, de esta forma se aseguran el seguimiento entre vehículos. Una perturbación que provoque un vehículo, como puede ser una frenada brusca, afectará al resto de vehículos del carril.

Hay tres factores humanos que afectarán al comportamiento del vehículo.

- Percepción: el conductor recoge toda la información relevante, principalmente a través de la vista, aunque también se puede recoger a través del oído. El conductor analiza datos como las velocidades del resto de vehículos, aceleraciones o frenadas, posibles accidentes, espacios entre vehículos...
- Toma de decisiones: el conductor analiza la información percibida para tomar una decisión. Ésta podrá variar en función de la experiencia del conductor y, por consiguiente, del número de decisiones que haya tenido que tomar previamente.
- Control: el conductor debería ejecutar sus decisiones con control, suavidad y rapidez obteniendo una retroalimentación de la información del comportamiento del vehículo, recogida a través de las fuerzas de inercia que soporta el conductor.

#### Modelo de Gipps.

Este modelo es muy utilizado por diversos programas, como el que se usará en este proyecto, y por ello se va a comentar brevemente. El modelo Gipps 1981 es un modelo de tipo empírico en el que se ofrece al conductor del vehículo seguidor la posibilidad de circular a dos velocidades. La primera de estas velocidades es la máxima a la que puede ir el vehículo, es decir, la velocidad correspondiente a un flujo libre donde la circulación no está restringida. En este caso, la expresión de la velocidad sería:

$$V_{n+1a}(t+T) = V_{n+1}(t) + 2,5 \cdot a_{n+1} \cdot T \cdot \left(1 - \frac{V_{n+1}(t)}{V_{n+1}^*}\right) \cdot \sqrt{0.025 + \frac{V_{n+1}(t)}{V_{n+1}^*}}$$

En donde

$V_{n+1}(t)$  es la velocidad del vehículo seguidor,  $n+1$ , en el instante de tiempo  $t$ .

$V_{n+1}^*$  es la velocidad deseada por el vehículo  $n+1$ .

$a_{n+1}$  es la aceleración máxima del vehículo  $n+1$ .

La segunda velocidad, denominada velocidad de desaceleración, es la velocidad máxima a la que puede circular un vehículo precedente, durante un periodo  $(t, t+T)$  debido a sus propias características y a las limitaciones impuestas por la presencia del vehículo predecesor. La expresión de esta segunda velocidad será:

$$V_{n+1b}(t+T) = d_{n+1} \cdot T + \sqrt{d_{n+1}^2 \cdot T^2 - d_{n+1} \cdot \left\{ 2[x_n(t) - L_n - x_{n+1}(t)] - V_{n+1}(t) \cdot T - \frac{V_n(t)^2}{d_n} \right\}}$$

En donde:

$d_n, d_{n+1}$  es la desaceleración máxima de los vehículo predecesor y seguidor,  $n$  y  $n+1$  respectivamente.

$L_n$  es la longitud total del vehículo predecesor.

La velocidad final del vehículo seguidor será el mínimo de las dos velocidades mencionadas, ya que, si la segunda es mayor que la primera, implica que la presencia del vehículo  $n$  no impone ninguna restricción en el movimiento del vehículo  $n+1$ . Por el contrario si la segunda velocidad resulta ser menor que la primera, el vehículo  $n+1$ , debe adecuar su movimiento a lo impuesto por el vehículo precedente.

$$V_{n+1}(t+T) = \min\{V_{n+1a}(t+T), V_{n+1b}(t+T)\}$$

### **3.2.3. Modelos mesoscópicos.**

Estos modelos cuentan con ventajas sobre los modelos macroscópicos y microscópicos. Por un lado son más fiables que los modelos macroscópicos y por otro, no requieren la precisión de datos que sí necesitan los modelos microscópicos. Los vehículos y el comportamiento del conductor no son distinguidos ni descritos individualmente, si no en términos con funciones de distribución de probabilidad. Estas distribuciones dependen de varias variables (aceleración, interacción entre vehículos, cambios de carril...) que describirán el comportamiento de cada conductor. Existen tres modelos generales que emplean esta metodología, modelos de distribución de intervalo, modelos de racimo y los modelos de teoría cinética de los gases.

## **4. ASPECTOS MEDIO AMBIENTALES: CONTAMINANTES Y TECNOLOGÍAS.**

Entre los objetivos de este proyecto se encontraba del análisis y definición de los principales contaminantes del sector del transporte, así como una breve descripción de las tecnologías actuales y futuras de los propulsores de los vehículos. Con el presente capítulo se abordarán estos objetivos de la manera más concisa posible ya que se trata de un campo extenso y muy estudiado.

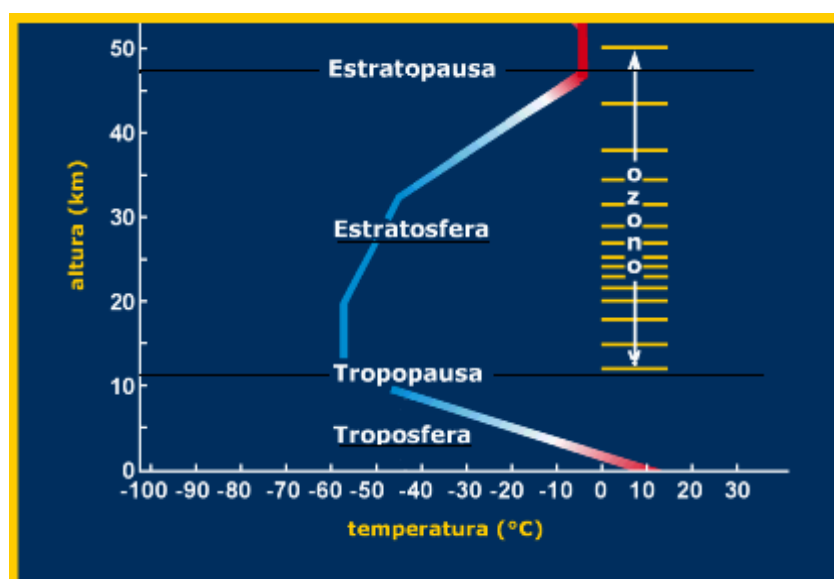
## **4.1. LA CONTAMINACIÓN ATMOSFÉRICA Y SUS FUENTES.**

Para comenzar con este capítulo se explicará que se entiende por contaminación atmosférica y las técnicas que se utilizan para medirla. De la misma forma se hará un breve repaso a los contaminantes más importantes del sector transporte así como sus consecuencias y posibles tecnologías para disminuir su emisión.



### 4.1.1. Composición de la atmósfera.

La atmósfera se define como es una capa gaseosa muy fina en comparación con el radio de la Tierra, sin embargo su extensión llega hasta alturas superiores a los 100 km. La capa más baja, donde se dan ñas condiciones necesarias para la vida humana, se denomina troposfera, que llega desde el suelo hasta alturas de entre 10 y 11 km. Debido a que el gradiente de temperatura medio en su interior es de  $-5,6^{\circ}\text{C}/\text{km}$  suelen aparecer fuertes corrientes verticales a causa de la convección térmica que provocan vientos en la superficie terrestre. La siguiente capa es una región estrecha, denominada tropopausa, de relativa estabilidad vertical. Sobre ella se encuentra la estratosfera, donde el gradiente térmico cambia a positivo, a causa de la absorción de los rayos ultravioleta (figura 4.4.1).[4]



*Figura 4.1.1: Gradiente térmico en la atmósfera.*

El primer paso para definir lo que se considera contaminación atmosférica parte de definir lo que se entiende por atmósfera normal o limpia. Definir la composición de esta atmósfera algo determinante ya que su composición química depende de la localización geográfica, del tiempo y de la altura. En la tabla 4.4.1 puede verse un análisis químico de los principales compuestos del aire atmosférico seco en la troposfera y sobre el océano, alejado de las masas de terreno y de la actividad del hombre. A esta composición habría que añadir del orden del 1% al 3% en volumen de agua además de otros compuestos en proporciones más pequeñas como trazas de dióxido de azufre, formaldehído, yodo, cloruro de sodio, amoníaco, monóxido de carbono, metano, polvo, bacterias y virus, polen y esporas.

COMPONENTE	MASA MOLAR	CONCENTRACIÓN		ESPESOR RELATIVO
		MOLECULAR	EN MASA	
Nitrógeno	28.00	78.08%	75.51%	6.35 km
Oxígeno	32.00	20.95%	23.14%	1.68 km
Argón	39.94	0.93%	1.28%	74 m
Neón	20.18	18 ppm	13 ppm	15 cm
Helio	1,00	5 ppm	0.7 ppm	4 cm
Kriptón	83.70	1 ppm	2.9 ppm	8 mm
Hidrógeno	2,00	0.5 ppm	0.03 ppm	4 mm
Dióxido de Carbono	44.01	350 ppm	533 ppm	2.8 m
Ozono	48.00	0-12 ppm	0-20 ppm	0-1 mm
Vapor de agua	18,00	0-4 %	0-2.5 %	0-300 m

*Tabla 4.1.1: Composición del aire troposférico.*

Esta composición suele mantenerse constante hasta los 34 km de altura, donde las fracciones ligeras de la atmósfera empiezan a prevalecer, así como productos de la disociación e ionización del aire.

## **4.1.2. La Contaminación atmosférica.**

Una vez explicado brevemente que se conoce por atmósfera, algunas de sus características principales y composición normal, se va a explicar que se conoce por contaminación, como se mide y sus principales contaminantes.

### **4.1.2.1 Definición de contaminación.**

Se define la contaminación atmosférica como la presencia de sustancias en el aire, que aisladas o en combinación con otras, resulten dañinas para la vida humana, de los animales, de las plantas, o que interfiera en el goce de la vida y de la propiedad, o limite las actividades humanas. Dada esta definición tan general la contaminación atmosférica puede estar constituida por sustancias muy diversas y proviene de numerosas fuentes.

A menudo se asocia contaminación atmosférica con industria y desarrollo, sin embargo, actualmente se reconoce que una fracción apreciable de las muertes prematuras en los países en vías de desarrollo, del orden de un tercio, se deben a la contaminación atmosférica, a veces simplemente debido a la existente en el propio hogar por el uso de combustible sólidos. La cuantificación de los efectos de la contaminación atmosférica son tan variados y relevantes, que los que más interés tengan para el sector transporte se comentarán con más detalle a lo largo del capítulo.

#### 4.1.2.2 Unidades de medida.

Resulta habitual expresar el contenido de un contaminante, en % en volumen, en partes por millón en volumen (ppmv o ppm simplemente), en partes por billón en volumen (ppbv, ppb, ppmmv o ppm) o en partes por tera (ppt).

La proporción volumétrica de gases no depende de las condiciones de presión y temperatura de la atmósfera, pues se comprimen o dilatan por igual todos los componentes de la mezcla.

Los contaminantes suelen estar en proporción muy pequeña en el aire, por lo que se puede asumir igualdad en las características termodinámicas del aire contaminado y del aire sin contaminar.

En la normativa de límites de emisión de contaminantes es habitual especificar la **concentración**. Sin embargo, si se diluyen los gases emitidos a la atmósfera se lograría cumplir con la legislación, a pesar de que las emisiones netas seguirán siendo iguales. Por ello se suele usar un gas de testigo para verificar si se ha efectuado una dilución. Un caso típico es el de la combustión, la cual suele realizarse con exceso de oxígeno que suele darse es motores Diésel, por ejemplo.

Por ello existen otro tipo de medidas de contaminación que no se basan en la concentración sino en la cantidad neta que se emite. En los vehículos a motor los contaminantes suelen medirse en unidades de masa por tiempo (g/s), o unidades de masa por longitud (g/km).

#### 4.1.2.3 Principios para el control.

El control racional de la contaminación atmosférica se apoya en cuatro principios básicos:

1. El aire es de dominio público (de la humanidad). El problema de la contaminación concierne no sólo al que la sufre sino al que la genera.
2. La contaminación atmosférica constituye un contaminante inevitable de la vida moderna, si bien minimizable. No resulta posible eliminar la contaminación, pero existen mejores modos de tratarla, si bien a un costo superior.
3. Se pueden aplicar los conocimientos científicos y la tecnología para reducir la contaminación atmosférica y sus efectos. El hombre no tiene porqué abandonar su forma de vida ni su tecnología, pero sí debe usarla para reducir el impacto creado y dejar a las generaciones venideras un mundo lo menos degradado posible y preferiblemente sostenible.
4. La aplicación de medidas correctivas no debe aumentar la contaminación, del tipo que fuere, en otros sectores del ambiente o en otras regiones.

#### **4.1.2.4 Contaminantes de la atmósfera.**

Debido a la definición tan general de lo que se puede entender por contaminación existen numerosos compuestos que pueden ordenarse en grupos más reducidos con características similares. Una posible clasificación de estos contaminantes puede ser la siguiente:

1. Materia particulada (PM) o partículas, que dispersadas en la atmósfera constituyen un aerosol, al ser materia en estado sólido o líquido finamente dividida y en suspensión en el aire. Se excluye el agua pura en gotas al no considerársela contaminante.
2. Compuestos que contienen azufre. Originan compuestos corrosivos e irritantes.
3. **Compuestos orgánicos.** Originan compuestos oxidantes, irritantes y cancerígenos. Los hidrocarburos se denominan a menudo HC.
4. **Compuestos que contienen nitrógeno.** Originan compuestos oxidantes y corrosivos.
5. **Óxidos de carbono** (monóxido, CO y dióxido CO<sub>2</sub>). Al dióxido de carbono no se le considera un contaminante como tal, ya que es esencial para la vida, sin embargo el crecimiento paulatino de su concentración es fundamental en el efecto invernadero.
6. Compuestos halogenados. Intervienen en la formación de contaminantes. Son corrosivos y destructores de la capa de ozono.
7. Metales. Algunos metales, especialmente los pesados, resultan tóxicos, por ejemplo el plomo, mercurio, cadmio. etc.
8. Compuestos radiactivos. Afectan a la salud y producen mutaciones.

### 4.1.3. Los contaminantes del sector transporte.

El transporte, junto con la vivienda y la industria comportan los 'tres tercios' respectivamente, de la contaminación atmosférica en los países desarrollados occidentales. Actualmente la mayoría del transporte se produce de forma autónoma, es decir, que se produce la tracción en el propio vehículo, portando un combustible.

El transporte terrestre es el causante primordial de la mala calidad del aire en muchas regiones, sobretodo en las grandes concentraciones urbanas, debido a los automóviles. Los contaminantes primarios habituales son los correspondientes a motores de combustión interna alternativos: HCs, CO, NOx y las partículas. Por su trascendencia a lo largo del proyecto se van a describir con mas de detalle la contaminación debida a los **hidrocarburos, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno**, principalmente sus efectos, fuentes, normativas y límites y las tecnologías de reducción actuales.

#### 4.1.3.1 Compuestos orgánicos.

Su variedad es enorme, siendo los **hidrocarburos**, denominados HC, del orden de la mitad y el resto otras sustancias. Se denominan compuestos orgánicos volátiles COV si ostentan tal propiedad y por tanto la posibilidad de estar diluidos en la atmósfera.

Las fuentes naturales son la mitad de intensas que las antrópicas, constituidas éstas primordialmente por el gas natural liberado en escapes y emisiones incontroladas o accidentales, **la combustión**, industria agropecuaria, etc.

#### Efectos.

No parece existir datos que indiquen un efecto generalizado y directo de los compuestos orgánicos acarreados por la atmósfera sobre la salud de los hombres o de los animales. Sin embargo, los hidrocarburos aromáticos polinucleares, presentes en el hollín y en algunas gasolinas, muestran una alta actividad cancerígena.

Lamentablemente los hidrocarburos no quemados, presentes en los productos de una combustión, en combinación con los óxidos de nitrógeno, forman oxidantes fotoquímicos. Estos son componentes del smog o niebla fotoquímica, la cual es dañina para la salud del hombre, los animales y las plantas.

### Fuentes principales.

Las fuentes de HC antrópico se reparten entre sistemas móviles, como los automóviles; y fijas, como centrales de energía, calefacciones...

Un 27% procede del transporte por carretera, un 17% de la industria de disolventes, 15% de la minería del carbón, 17% del metano de los vertederos, 10% de escapes de las redes de gas y 12% de fuentes naturales, según Kiely [5].

Un automóvil convencional libera del orden de 1 g/km de HCs, habiéndose reducido esta cifra significativamente en los últimos años gracias a la renovación del parque automovilístico y al control de las ITV's.

### Límites en la atmósfera.

Dado que los hidrocarburos son de composición muy distinta y sus efectos son principalmente debidos a los contaminantes secundarios que originan, o bien a efectos particulares de alguno de ellos, la UE no los regula explícitamente. Otra causa es que algunos de ellos son tan dañinos que no existe concentración umbral para sus efectos, por lo que es necesario eliminarlos completamente

### Tecnologías de reducción.

Las emisiones procedentes de los vehículos automóviles proceden actualmente de forma mayoritaria del proceso de arranque en frío y el consiguiente proceso de calentamiento. Una vez caliente el motor, las emisiones son mayores a carga parcial y al **ralentí**. Por ello se incentiva desde los poderes públicos el uso del transporte público especialmente para trayectos cortos donde no da tiempo a que el motor coja su temperatura óptima. La emisión de aceite inquemado en forma de partículas empieza a ser relevante tras las fuertes medidas de reducción de los volátiles.

Los motores de gasolina convencionales emiten más HCs que los Diésel, por el contacto de la gasolina con las paredes internas del motor que al estar frías provoca que se condense y no se queme. Su emisión se ve reducida con el uso del catalizador de oxidación del escape, que los oxidan completamente a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O. La emisión de los motores de dos tiempos es muy superior a la de los de cuatro tiempos, por lo que su uso va en declive, por limitaciones legales.

### 4.1.3.2 Compuestos que contienen nitrógeno

A continuación se va a hablar de los óxidos de nitrógeno que son producidos en gran medida por el sector transporte. Este contaminante tienen un especial interés debido a los efectos que produce tanto en la salud humana como en el entorno.

De los seis o siete **óxidos de nitrógeno** tan solo el monóxido (NO) y el dióxido (NO<sub>2</sub>) son reconocidos actualmente como contaminantes atmosféricos. La conversión de NO en NO<sub>2</sub> en la atmósfera es muy rápida. Por ello se suele evaluar la contaminación sumando el contenido de ambas especies, y juntos se denominan NO<sub>x</sub>.  $\text{NO}_x = \text{NO} + \text{NO}_2$

El protóxido u óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) se encuentra en la baja atmósfera en cantidades detestables, resultado de la acción biológica natural y en parte a la combustión, pero no se le considera un contaminante en sí mismo.

#### Fuentes.

Existen 3 fuentes principales de formación de estos óxidos, dos antrópicas y una natural.

1. Las fuentes antrópicas de NO<sub>x</sub> son del orden del triple que naturales. La fuente principal es la unión del nitrógeno y el oxígeno atmosféricos sometidos a altas temperaturas, por lo que **la combustión es una fuente de primera magnitud**. En ella, la combinación: de alta temperatura y oxígeno disponible (lo cual es habitual es combustiones pobres en combustible) favorece la formación de NO y en menor medida NO<sub>2</sub>. Los monóxidos de nitrógeno que se producen mediante este proceso se denominan NO<sub>x</sub> térmico.

2. Si el combustible incorpora nitrógeno en sus moléculas (el petróleo y el carbón pueden contener hasta el 3%), al arder también se libera NO. A estos monóxidos se les conoce como NO<sub>x</sub> del combustible.

3. La descomposición de los nitratos del suelo, junto con los rayos de las tormentas, constituyen una fuente adicional natural

#### Efectos.

- El dióxido de nitrógeno (NO<sub>2</sub>) es un fuerte irritante, más intenso que el monóxido (NO). Sus efectos sobre la salud consisten en alteraciones pulmonares, tales como un aumento de la bronquitis infantil con exposiciones prolongadas a concentraciones incluso inferiores al 0,01 ppmv. Ha sido relacionado con la fibrósis pulmonar crónica.

- La exposición de las plantas a los óxidos de nitrógeno da como resultado alteraciones y pérdidas de producción en algunas especies, a concentraciones del orden de 1 ppmv.

- El dióxido reacciona con el agua para formar ácido nítrico ( $\text{NO}_3\text{H}$ ), que resulta ser un ácido fuerte corrosivo. Participa en la lluvia ácida.
- El dióxido absorbe la radiación luminosa y en una concentración de 0,25 ppmv causa un apreciable efecto en la visibilidad (color pardo-marrón).
- Como ya se mencionó, los óxidos de nitrógeno, en combinación con los hidrocarburos inquemados forma el nebluno al reaccionar en presencia de la luz solar.

#### Limites en la atmósfera.

Los sectores contribuyentes a las emisiones de  $\text{NO}_x$  son los que queman combustibles, por lo que basta con buscar la generación térmica de energía. Actualmente se aplican severas normas de limitación de emisiones que están en torno a 100 ppmv, pero podrían bajar a las decenas de ppmv en el futuro.

El  $\text{N}_2\text{O}$  aunque es un gas inocuo para el ser humano posee un potente efecto invernadero, unas 230 veces superior al  $\text{CO}_2$ . Su tiempo de residencia en la atmósfera es prolongado, unos 120 años. Afortunadamente se produce en cantidades mucho menores que los otros óxidos.

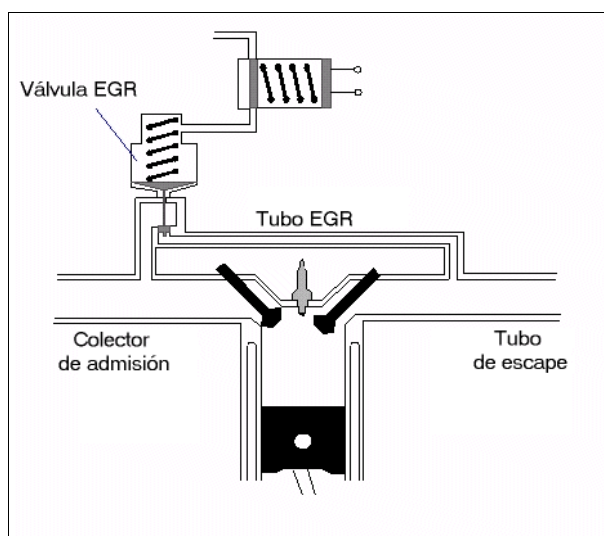
#### Tecnologías de reducción.

El empleo de medios de reducción de las temperaturas pico en los dispositivos de combustión es un sistema efectivo de reducción de los  $\text{NO}_x$ . Para ello se emplea la dilución de los gases durante la combustión con aire adicional, gases ya quemados e incluso agua o  $\text{CO}_2$ .

La combustión con exceso de oxígeno reduce las temperaturas, lo cual es favorable, pero ha de evitarse un exceso moderado, pues aparte de no bajar lo suficiente la temperatura proporciona oxígeno para la formación de los  $\text{NO}_x$ , por lo que el efecto es desfavorable.

La recirculación de gases ya quemados es una técnica habitual para limitar la formación de  $\text{NO}_x$ . Esta recirculación puede ser interna, logrando que gases ya quemados vuelvan a la zona de combustión, o externa. Si la recirculación es externa, se toman gases de escape, se enfrían y se reintroducen con los reactantes. Los gases quemados son moléculas inertes, sin apenas oxígeno y por ello sumideros de energía, por lo que reducen la temperatura de la llama. En los vehículos de combustión interna esta recirculación se realiza mediante una válvula denominada EGR. En la figura 4.1.3 aparece de manera esquematizada el funcionamiento de esta válvula.





*Figura 4.1.2: Esquema válvula EGR.*

La válvula EGR permite o impide el paso de los gases de escape provenientes del tubo de escape hacia el colector de admisión.

En los motores de gasolina la emisión a la atmósfera se limita con el uso de catalizadores en el escape de los automóviles, que reduce los NO<sub>x</sub> a N<sub>2</sub>.

### 4.1.3.3 Monóxido de carbono.

Para finalizar con estos tres contaminantes se describirán las fuentes, efectos y tecnologías de reducción para el monóxido de carbono. Este compuesto es un gas incoloro e inodoro, que interviene en la química de la atmósfera, pero que en la atmósfera libre se encuentra en concentraciones lo suficientemente bajas para que no manifieste su carácter **fuertemente tóxico**.

#### Fuentes.

El monóxido de carbono se produce en el interior de todas las llamas de hidrocarburos y afortunadamente se oxida inmediatamente aguas abajo si existe oxígeno disponible y por efecto de la alta temperatura, a dióxido de carbono (que es inocuo). Ésto ocurre para la mayoría del CO hasta llegar a proporciones pequeñas, debido a que la velocidad de las reacciones es finita. Si por el contrario no existe oxígeno con el que reaccionar, estas proporciones residuales aumentan. Por este motivo las fuentes más importantes, tanto naturales como antrópicas, son debidas a la combustión.

### *Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.*

Dentro del CO emitido debido a la combustión la fuente mas importante la constituyen los vehículos automóviles y entre ellos, los de gasolina, especialmente durante su funcionamiento en tráfico urbano. El 70% de todo el CO que se genera es debido a la combustión de fuentes móviles.

#### Efectos.

Este gas neutraliza una parte de la hemoglobina de la sangre formando un compuesto estable, la carboxihemoglobina, la cual no puede transportar el oxígeno necesario para la vida. Es habitual encontrar del orden de 5 a 20 ppmv en el aire urbano y se conocen alteraciones psicomotoras en seres humanos con concentraciones del orden de 30 ppmv, pero no dañinas.

No se detectan efectos dañinos para la vida hasta que no se alcanzan concentraciones del orden de 100 ppmv, durante largos periodos de tiempo, los cuales rara vez se alcanzan. 100 ppmv se considera el límite para actividades laborales, es decir, para individuos sanos y con una exposición de 8 horas diarias. Por debajo de este límite la mayoría de las personas experimentan cansancio y mareos en el peor de los casos.

Sin embargo para concentraciones en torno a 750 ppmv **puede causar la muerte** a seres humanos. La carboxihemoglobina formada es reconvertida espontáneamente en un 50% a oxihemoglobina en un periodo del orden de 3 a 4 horas, demasiado tiempo para las víctimas, que mueren por falta de oxígeno aunque respiren.

No se consideran acumulativos los efectos del CO y actualmente no parece existir un acuerdo unánime sobre si el CO es un contaminante umbral, ya que se informa de efectos dañinos aún a bajas concentraciones. En locales mal ventilados, **atascos de tráfico**, o en fuertes concentraciones de máquinas térmicas, su efecto se nota y puede ser incluso mortal si la concentración es alta.

#### Límites.

Las normas de calidad de aire hablan de límites al CO atmosférico del orden de 9 ppmv, la cual parece mucho más baja que la correspondiente a efectos dañinos de consideración.

Las emisiones de CO de motores y dispositivos de combustión están limitadas. Generalmente se especifica una inspección periódica, en España a través de la ITV, que incluye la medición de emisiones para prevenir una mala combustión, y con ello con el peligro de emitir altas concentraciones de este gas venenoso.

Tecnologías de reducción.

La principal herramienta para evitar las emisiones de CO es evitar la combustión imperfecta, incompleta o sin el oxígeno necesario. Salvo un diseño defectuoso, hoy en día es muy difícil que esto ocurra debido a las limitaciones legislativas para la emisión de contaminantes y a las normas de seguridad de los aparatos de combustión. Por ello, lo principal para evitar una emisión anormal de CO es llevar a cabo un mantenimiento adecuado y realizar eventualmente una vigilancia de las emisiones de este gas.

Los motores de gasolina emiten una concentración elevada de CO en el estado de ralentí y cargas parciales por lo que debe evitarse el funcionamiento en estos regímenes. Actualmente se utilizan catalizadores de oxidación de gases de escape donde el CO es oxidado a CO<sub>2</sub> con lo que se consigue disminuir enormemente la emisión de este gas.

## **4.2. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LOS PROPULSORES DE LOS VEHÍCULOS AUTOMÓVILES.**

En el apartado anterior se dio a conocer cuales son las fuentes principales de la contaminación atmosférica. La mayor parte de la contaminación atmosférica proviene de la combustión, y de las fuentes antrópicas, un tercio es debido al sector transporte. Por esta razón se hace necesario comentar, aunque sea brevemente, las características medioambientales de los propulsores de los vehículos actuales y algunas de las tecnologías futuras.

En 2006 las ventas de automóviles en Europa se dividían en un 60% con motor de gasolina y un 40% con motor Diésel. En España las ventas de vehículos Diésel han superado a las de los que utilizan gasolina desde la década anterior. Para ese mismo año, 2006, las ventas de vehículos eléctricos era insignificante, así como la de los vehículos híbridos, aunque estos últimos han ido en aumento y se espera que continúen creciendo. El motor de dos tiempos está prácticamente abandonado, salvo en ciclomotores, y actualmente en regresión a causa de su carácter fuertemente contaminante.

## 4.2.1. Motor Diésel.

El primer tipo de propulsor en el que se va a hacer hincapié es en el motor de ignición espontánea, conocido como motor Diésel en honor a su inventor. En estos motores de combustión se comprime el aire hasta presiones y temperaturas que garantizan la autoignición rápida del combustible que se inyecta inmediatamente después de la carrera de compresión del pistón. Por ello, al inyectarse directamente al cilindro con las condiciones de presión y temperatura adecuadas, el combustible arde de inmediato, con una llama que rodea las gotas.

La proporción global combustible-aire en este motor es pobre en combustible, o dicho de otro modo, tiene un exceso de aire, lo que se traduce en unos **bajos niveles de CO**. También se consiguen bajos niveles de HCs al no llegar el combustible a entrar en contacto con las paredes del cilindro. No obstante, se emiten muchos HCs en el arranque en frío y durante los primeros segundos que le siguen, por no encontrarse aún el motor a la temperatura adecuada y no quemarse completamente todo el combustible.

Sin embargo, la llama de difusión que se establece durante la autoignición es de alta temperatura, que unido al exceso de oxígeno provoca que **se genere mucho NOx**. Este contaminante lamentablemente no desaparece durante la expansión de los gases, como si ocurre con la conversión de CO a CO<sub>2</sub>.

Otro efecto no deseable y muy contaminante, es la generación de humo. Esto se produce debido a la pirólisis de las gotas de combustible rodeadas por la llama, que origina una partícula carbonosa por cada una de ellas. A pesar del exceso de aire en la cámara de combustión, no es posible su combustión, dado el rápido enfriamiento de los gases por la expansión y a que tan solo la superficie de las gotas se encuentra rodeada de oxígeno.

Gracias a que estos motores utilizan una mezcla globalmente pobre de combustible, junto con la turboalimentación y una relación de compresión elevada, ha permitido que el motor Diésel sea capaz de eficiencias energéticas superiores al motor de gasolina, pudiendo superar el 50% en condiciones operativas favorables.

El progreso de la tecnología Diésel es un fenómeno típicamente europeo, ya en los EEUU este tipo de motores es muy minoritario, y parece que Asia sigue a Europa pero con un cierto retraso. Este progreso ha permitido que este tipo de motor sea una opción atractiva para automóviles de turismo, incluso en los tamaños menores. Proporciona cierta fiabilidad, facilidad de conducción y bajo consumo aunque su coste y mantenimiento es mayor.

#### **4.2.1.1 Principales contaminantes del motor Diésel y soluciones.**

Aunque el motor Diésel cuenta con las ventajas de una alta eficiencia energética y unas bajas emisiones de HC's y CO, debido a su funcionamiento resulta ser más contaminante que el motor de gasolina en la emisión de humo, materia particulada; y óxidos de nitrógeno.

##### Materia particulada (PM).

Como ya se comentó, uno de los mayores problemas de contaminación del Diésel es el humo, formado por partículas individuales de 10 a 80 nm unidas entre sí, con hidrocarburos y sulfatos hidratados adsorbidos en su superficie, cuando ya está en la atmósfera. Actualmente puede reducirse la cantidad emitida con mejoras en la combustión, pero parece que, aún así, próximamente habría que recurrir a instalar filtros de partículas en el escape, como solución definitiva.. Éstas quedan retenidas en un sustrato cerámico poroso, pero suponen una contrapresión creciente al flujo de gases de escape, según se produce la colmatación. Cuando ésta va a resultar excesiva se queman las partículas usando un catalizador, de forma controlada para evitar la destrucción del filtro. Los fabricantes europeos ya han puesto en el mercado del orden de 1 millón de automóviles con filtro, pero aún queda pendiente su proliferación masiva.

##### NOx.

El otro de los mayores problemas del Diésel son los NOx, emitiendo este tipo de vehículos entre 8 y 10 veces más un motor de gasolina de características similares. Si bien se tratan de disminuir realizando recirculación de gases de escape (EGR), la reducción no es lo suficiente.

El futuro de la tecnología de reducción de los NOx no está aun claro. Europa parece apostar en estos momentos por la reducción catalítica selectiva SCR (Selective Catalytic Reduction). Consiste en añadir amoníaco al gas de escape de manera dosificada, de tal modo que el NOx se convierta en agua y nitrógeno. El gas tóxico amoníaco habría de ser portado en el vehículo siendo aun una incógnita el despliegue de una red de distribución de este gas. Se prefiere transportar una disolución de urea en estado sólido, la cual es una fuente de amoníaco al descomponerse.

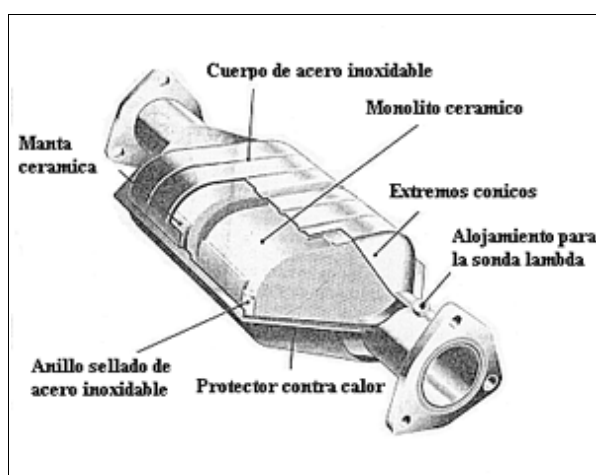
## 4.2.2. El motor de gasolina.

Este motor tradicionalmente necesitaba una mezcla homogénea de gasolina con el aire aspirado, lo que se denomina aire carburado, antes de entrar al cilindro. Tras ser comprimida esta mezcla durante la carrera de compresión, salta una chispa que la inflama de manera controlada y en el momento preciso. La llama que se establece consume la carga en el cilindro desde su centro hasta llegar a las paredes. Esta forma de proceder solo es posible con mezcla rica de combustible, lo cual supone un consumo excesivo y alta contaminación; con mezcla estequiométrica o apenas pobre. La limitación del lado pobre viene de la dificultad de establecer una llama y que ésta complete la combustión sin fallos. Por esta razón estos motores siempre han funcionado con mezclas estequiométricas, lo que unido a una baja compresión, les ha hecho tener un rendimiento menor que en los motores Diésel.

Recientemente se está incorporando a los motores de gasolina la inyección directa de combustible al cilindro. Esta nueva tecnología consigue que se pueda hacer uso de mezclas globalmente pobres, con las mejoras en el rendimiento que eso conlleva.

### 4.2.2.1 El catalizador de tres vías.

Ya se vio en el apartado anterior que generalmente los motores de gasolina emiten más cantidad de HC's y CO que los motores Diésel. Para los motores que utilizaban mezclas exactamente estequiométricas existe una tecnología que reduce significativamente las emisiones de estos motores. Para conseguirlo se reduce la contaminación aguas abajo del motor, es decir, en el tubo de escape, y para ello se hace uso de lo que se conoce como catalizador de tres vías (figura 4.2.1).



*Figura 4.2.1: Catalizador de 3 vías.*

Este catalizador no es más que un paquete cerámico o metálico con finos túneles por donde se ve obligado a transitar el gas de escape en su camino hacia la atmósfera. Estos conductos están recubiertos por una fina capa de metales preciosos (Pt, Pd, ...) que realizan la función catalizadora. El resultado buscado es la oxidación del CO y los HC a CO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>O respectivamente.

Además, simultáneamente se produce la reducción de los NO<sub>x</sub> a N<sub>2</sub>, lo que provee de oxígeno para las dos oxidaciones anteriores. La razón de marchar con mezcla estequiométrica es que es precisamente con esta proporción donde se logra limpiar eficiente y simultáneamente los tres contaminantes.

El resultado es un vehículo, que si bien **no ostenta un consumo reducido, resulta limpio, al menos más que el Diésel**. En el Diésel no es efectivo el catalizador de tres vías por actuar con mezclas globalmente pobres, para las cuales su emisión de CO y HC es baja y, sin embargo, sus altas emisiones de NO<sub>x</sub> no pueden ser eliminadas por este catalizador

La emisión de partículas carbonosas del motor de gasolina es muy baja, salvo que actuara a dosados extraordinariamente ricos, cosa que en la actualidad no ocurre salvo en los primeros instantes del arranque en frío. Se produce entonces, además, una emisión elevada de partículas de HCs condensados. Éste no es eliminado por el catalizador de tres vías por actuar frío, con lo que la catálisis no se produce.

Las exigencias de baja contaminación están llegando a un punto en el que las emisiones de vapor de aceite lubricante que ha pasado a la cámara de combustión empiezan a ser apreciables. Forman partículas de HCs al condensar en la atmósfera.

### **4.2.3. Tecnologías alternativas.**

Para finalizar con este apartado se van a describir dos tecnologías alternativas a los propulsores actuales. La primera de ellas aunque no consigue eliminar las emisiones de los propulsores actuales, si que las disminuye casi a la mitad en vías urbanas. La segunda tecnología si que consigue eliminar completamente las emisiones contaminantes, pero su implantación no será posible al menos hasta finales de la década de 2020

### **4.2.3.1 El motor híbrido.**

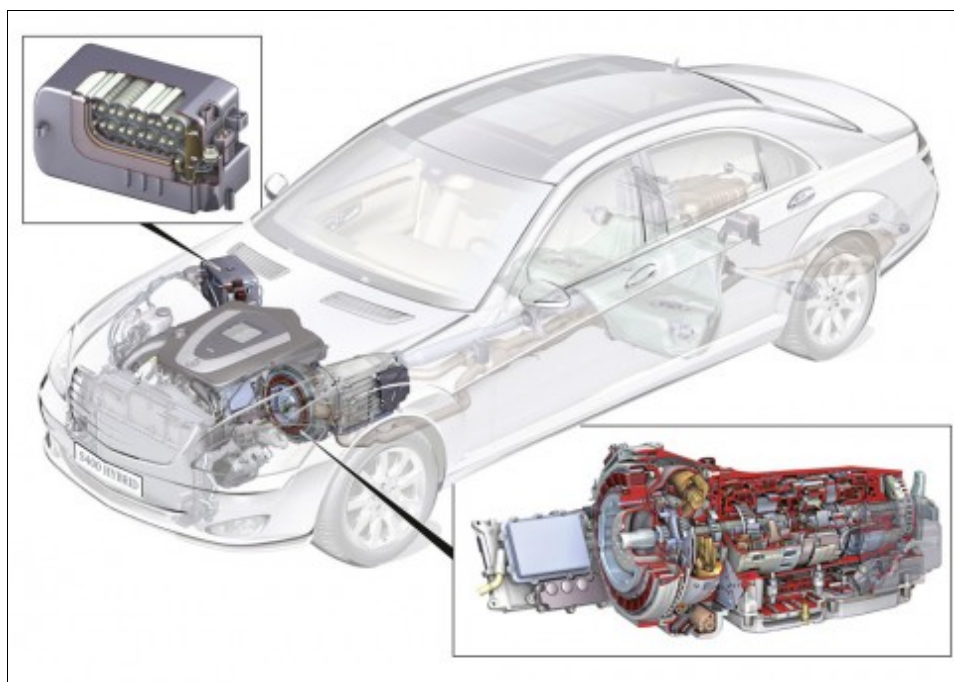
A la primera de estas alternativas se la conoce como motor híbrido. Se trata de una combinación de motor térmico (generalmente de gasolina por coste y peso) conectado a un generador eléctrico y de un motor eléctrico asistido por una batería y/o ultracondensadores. Los ultracondensadores son un medio de almacenamiento de electricidad con una capacidad de carga y descarga superior a la batería. Por lo tanto resultan adecuados para proporcionar intensidades elevadas en la aceleración y soportarlas en frenada.

Esta combinación consigue:

- Disminuir el peso total con respecto al automóvil exclusivamente eléctrico, además se elimina el largo tiempo de carga y aumenta la autonomía al repostar combustible convencional.
- Evitar el exceso de contaminación y ruido del motor térmico en tráfico lento, al poder funcionar en modo exclusivamente eléctrico. En caso de agotamiento de las baterías se pone en marcha el motor térmico en condiciones de máximo rendimiento hasta recargarlas siendo además posible la propulsión.
- Reducir el tamaño del motor térmico, ya que el motor eléctrico puede ayudarle y sumar esfuerzos en aceleraciones y cuestas cortas.
- Regenerar la energía de la frenada y cuesta abajo, cargando baterías, al actuar el motor eléctrico como generador. De esta manera esta energía puede volver a usarse disminuyendo la necesidad de utilizar el motor térmico para recargar las baterías, con lo que se disminuye el gasto de combustible.
- Mientras el vehículo está parado el motor térmico está apagado, ni se gasta combustible, ni se emiten contaminantes.
- El motor térmico permite calefacción abundante ya que puede ser usado exclusivamente para ese fin.
- El consumo en ciudad se reduce con respecto al motor térmico, ya que es posible la utilización del motor eléctrico en situaciones donde el térmico tendría un mal rendimiento.

En la figura 4.2.2 puede verse un modelo de producción actual con esta tecnología donde se puede ver donde se aloja la batería y el motor eléctrico.



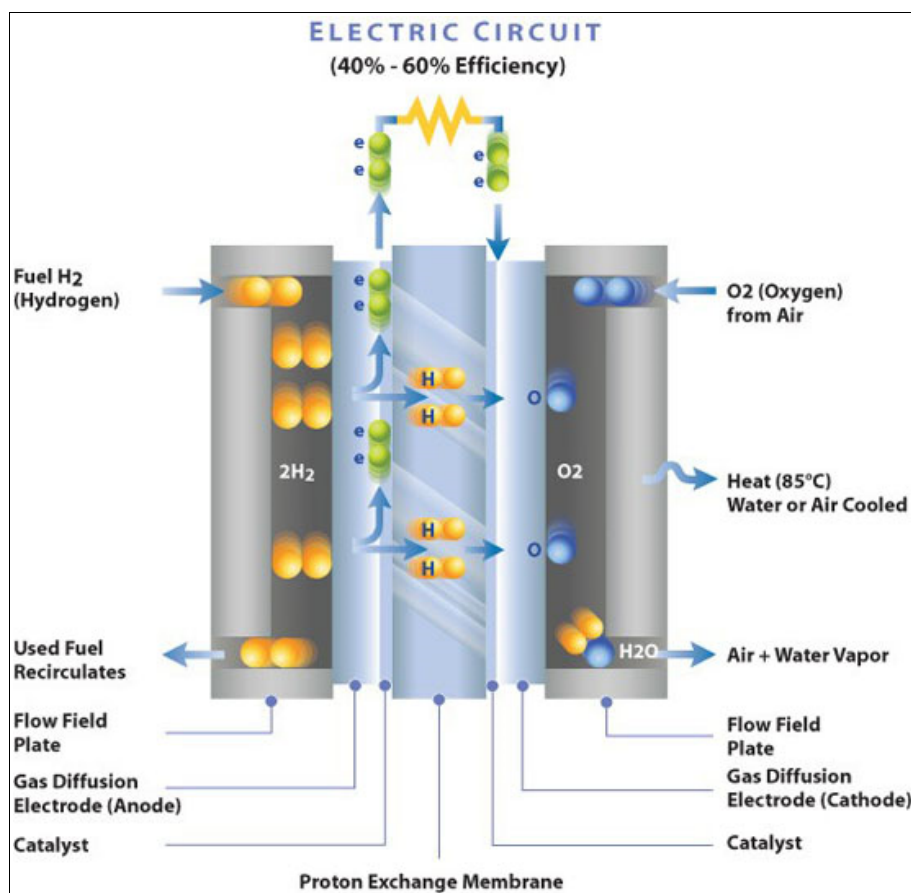


*Figura 4.2.2: Empleo de la tecnología híbrida en un automóvil  
(Fuente: Mercedes-Benz).*

Las emisiones de estos vehículos actualmente son inferiores a EURO IV aunque de momento no todas las marcas ofrecen esta tecnología y sus ventas aún están lejos de los motores convencionales, aunque en aumento.

#### **4.2.3.2 La célula de combustible.**

A la segunda tecnología se la conoce como célula de combustible, esta tecnología logra convertir la energía química del combustible en electricidad, sin el paso intermedio de la energía térmica. Es como una batería que actúa estacionariamente, consumiendo un combustible y aire en lugar de sus sustancias internas. Su eficiencia teórica puede ser de hasta del 100%, pero diversos fenómenos disipativos la reducen hasta valores del 40% al 60% actualmente. El resto es calor a una temperatura que depende de la tecnología usada. En la figura 4.2.3 aparece un esquema simplificado de una célula genérica.



*Figura 4.2.3: Célula de combustible.*

Los combustibles de elección para los automóviles son el hidrógeno y el metanol, ambos necesariamente de gran pureza para evitar el envenenamiento de la célula. Se puede usar gasolina o gasóleo Diésel, pero requieren un reformado para generar hidrógeno a bordo.

El peso total resulta actualmente superior a los motores térmicos, debido a la necesidad de compresores, ventiladores, electrónica de control y de potencia, baterías y acondicionamiento del combustible. En la figura 4.2.4 aparece una imagen de esta tecnología en un automóvil actual.



*Figura 4.2.4: Implantación de la célula de combustible en un vehículo actual (Fuente: General Motors).*

Una parte importante es el peso del tanque de almacenamiento de hidrógeno que por encontrarse a presiones muy elevadas (300 bar) ha de ser muy resistente.

El coste actualmente es muy alto, pero se espera un abaratamiento según progrese la tecnología y se logren economías de escala.

Su nula contaminación atmosférica, ausencia de ruido y vibraciones y elevada eficiencia le hacen candidato para el futuro como planta motriz de los automóviles. Al usarse tracción eléctrica es posible **la regeneración y el consumo nulo a vehículo parado**. Es actualmente aceptado que su introducción en el mercado será meramente testimonial hasta por lo menos 2020.

## **5. APLICACIONES INFORMÁTICAS.**

Para la realización de este estudio se utilizaran varias herramientas informáticas que por su trascendencia posterior resulta necesario introducir. El presente capítulo tiene como finalidad dar a conocer los programas informáticos que serán utilizados para la realización de este proyecto, sus aspectos básicos y datos relevantes.

## **5.1. GETRAM.**

La herramienta informática utilizada para la simulación de tráfico es el programa de simulación GETRAM ( Generic Envirionment for Traffic Analysis and Modelling). Para el presente proyecto se utilizará la versión 4.1, que a pesar de ser antigua es suficiente

El desarrollo de GETRAM ha ido evolucionando durante más 20 años de investigación. Decenas de publicaciones científicas y los comentarios de los usuarios derivados de cientos de proyectos del mundo real han ido depurando y mejorando el programa.

Este programa ha sido utilizado para aplicaciones a diferentes escalas y de distinta complejidad: desde la optimización de un peaje en la Terminal de Carga de Tokyo, hasta para ayudar a controlar, en tiempo real, los semáforos en toda la carretera de circunvalación de Madrid (M30).

En España este programa es comercializado por la empresa TSS (Transport Simulation System) con sede en Barcelona. Esta empresa, además de suministrar licencias a diferentes clientes, tiene como negocio la consultoría de proyectos de tráfico y transporte.

### Estructura del Programa.

Para la versión utilizada en este proyecto, la herramienta GETRAM se divide en tres bloques con tres marcados usos y aplicaciones:

- El Editor TEDI ( Traffic Editor).
- El simulador AIMSUN(Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks).
- El simulador 3D AIMSUN 3D (Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Non-Urban Networks in 3D).

#### **5.1.1. Aplicación TEDI.**

Su principal utilidad es la construcción de modelos de redes de tráfico para su uso posterior con simuladores de tráfico como son AIMSUN o AIMSUN 3D. Para facilitar esta tarea, TEDI dispone de ciertas herramientas y ayudas. Existe la posibilidad de cargar un fondo en la zona de trabajo (*background*) que coincida con la zona urbana que se quiere modelar (*network*). De esta forma se tiene una referencia sobre la que colocar los carriles (*sections*) y los cruces (*juntions*).[6]

#### **5.1.2. Aplicación AIMSUN.**

Se trata de un simulador de tráfico microscópico válido para diferentes redes de tráfico: urbanas, autopistas, carreteras de circunvalación, arteriales y cualquier combinación de ellas. Se ha diseñado e implementado como un instrumento de análisis del tráfico en tránsito para que sirva de ayuda a los ingenieros en el diseño y evaluación de sistemas de tráfico.[7]

AIMSUN sigue un enfoque de simulación microscópica. Lo cual quiere decir que el

comportamiento de cada vehículo de la red está siendo continuamente modelado durante el tiempo que se encuentra en la red. También se trata de un simulador combinado discreto / continuo. Esto significa que hay algunos elementos del sistema (vehículos, detectores), cuyos estados cambian continuamente durante el tiempo simulado, que se divide en periodos de tiempo más cortos denominados ciclos. Y, a su vez, existen otros elementos (las señales de tráfico, puntos de entrada), cuyos estados cambian discretamente en puntos específicos en el tiempo de simulación.

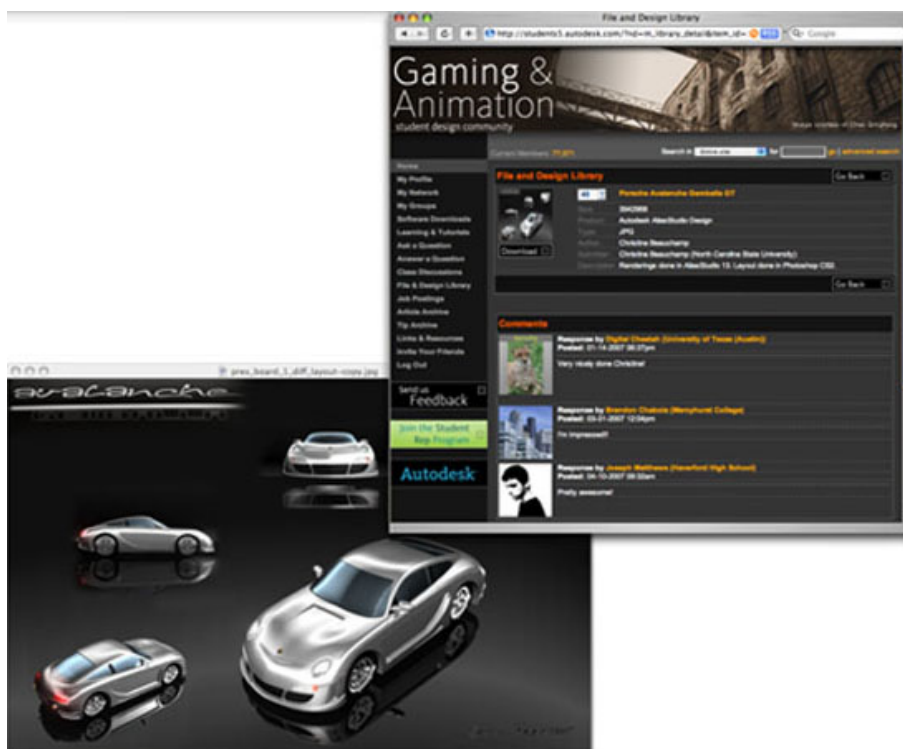
### **5.1.3. Aplicación AIMSUN 3D.**

Esta herramienta se utiliza para simular gráficamente el comportamiento de una red en tres dimensiones. Este módulo no es capaz de generar datos por sí mismo y simplemente se limita a representar la zona de estudio de la manera más detallada posible. Todos los edificios y objetos que se quieran ver a través de esta aplicación han debido de ser editados previamente en TEDI y guardados como un escenario en AIMSUN. A nivel visual se pueden cambiar parámetros como la orientación de la cámara, el color y tamaño de los vehículos, la velocidad de simulación o la iluminación.[8]

## 5.2. AUTODESK 3D STUDIO MAX

**Autodesk 3D Studio Max** es un programa de creación de gráficos y animación 3D desarrollado por *Autodesk Media & Entertainment* (anteriormente conocidos como *Discreet* y *Kinetix*). Fue desarrollado como sucesor para sistemas operativos posteriores a WIN32 a partir de su antecesor *3D Studio* creado para sistemas operativos DOS. *Kinetix* fue más tarde fusionada con la última adquisición de *Autodesk*, *Discreet Logic*.

*3D Studio Max* es uno de los programas de animación 3D más utilizados en la actualidad. Dispone de una sólida capacidad de edición, una omnipresente arquitectura de plugins y una larga tradición en plataformas para Microsoft Windows. Este programa es, y ha sido, utilizado en mayor o menor medida por empresas desarrolladoras de videojuegos, aunque también es utilizado en el desarrollo de proyectos de animación como películas o anuncios de televisión, efectos especiales y en arquitectura. como se puede ver en la figura 5.2.1. aparecen algunos ejemplos de modelos creados por este por esta herramienta.



*Figura 5.2.1: Ejemplo de modelos 3D desarrollados en 3D Studio.*



## **6. MODELADO DE LA RED.**

Una vez presentada toda la teoría y conceptos básicos para el seguimiento de la realización del proyecto, en el presente capítulo se va a describir el proceso llevado a cabo para el estudio de la madrileña glorieta de las Pirámides. Para modelar la red se va a utilizar el programa informático GETRAM presentado en el capítulo anterior.

Para usar correctamente este programa, se deben seguir una serie de pasos secuencialmente hasta conseguir un modelo informático de la red que AIMSUN pueda simular. Estos pasos se enumeran a continuación[6]:

1. Descripción de la geometría de la red: con ayuda de un plano y con las herramientas básicas de TEDI '*sections*' y '*juntions*' se puede dibujar cualquier red. Los parámetros geométricos para cada sección son: el número de carriles, el ancho del carril, la pendiente y la longitud de cada tramo. También hay que introducir parámetros no geométricos de relevancia, como la velocidad máxima por carril, la capacidad de la vía o el número de carriles reservados si los hubiese. Para el caso de los cruces se deben indicar los giros permitidos para cada carril y el tipo de control que van a llevar, ya sea mediante un semáforo, un STOP o un ceda el paso.
2. Configuración de un plan de control: en el caso de que algún cruce o sección tuviese uno o varios semáforos (*metering*) se debe crear un plan de control (*control plan*). Con esta herramienta se programan los ciclos semafóricos: fases, interfases, duración...
3. Una vez que se dispone de la topología y control de la red, se debe especificar el número de vehículos que circulan por la red y las trayectorias o caminos que siguen. TEDI dispone de dos formás para introducir estos datos.

- I. Result Container: Se indican los flujos que entran a la red por cada una de las secciones de entrada. Además es necesario indicar la proporción de vehículos que toman una determinada dirección en aquellas secciones que tengan posibilidad de giro.
  - II. Matriz Origen-Destino ( O/D Matrix): Consiste en una matriz donde las entradas y salidas, a lo que TEDI denomina como centroides (*centroids*), aparecen como las filas y las columnas de esta matriz. Los centroides se pueden definir como fuentes (filas) o como sumideros (columnas), según sean el origen o el destino de los vehículos. Cada uno de estos centroides está ligado con al menos una sección por donde aparecerán o desaparecerán los vehículos. Resumiendo brevemente, esta matriz indica el número de vehículos que van desde una fuente hasta un sumidero.
4. Transporte público. El flujo de autobuses se introduce en la red de manera diferente a la del resto de vehículos, debido principalmente al hecho de que sus rutas y sus intervalos de llegada a la red son fijos. TEDI tiene una herramienta denominada plan de transporte (*transport plan*), donde se indica el trazado de cada línea de autobús, las paradas, y las frecuencias de paso y tiempo de parada.
  5. Parámetros de los vehículos y condiciones de tráfico. GETRAM ofrece una gran cantidad de parámetros disponibles para caracterizar los diferentes tipos de objetos y las condiciones del tráfico. Se podría decir que la única limitación en la precisión de el modelo es la cantidad y la exactitud de los datos recogidos del sistema real. Por ejemplo, variables como las tasas de consumo de combustible de cada tipo de vehículo, velocidades de giro en las intersecciones o las reacciones de los conductores a un mensaje variable, son configurables.

A partir de aquí se desarrollaran en detalle estos 5 pasos para el caso concreto de la glorieta de las Pirámides.

## 6.1. DEFINICIÓN DE LA GEOMETRÍA.

La glorieta de las Pirámides cuenta con cinco ramales de entrada y otros cinco de salida, como puede verse en la figura figura 6.1.1.



*Figura 6.1.1: Imagen por satélite de la glorieta de las Pirámides.*

Las vías de entrada son:

- Salida de la M30, tres carriles.
- Paseo de las Yererías, un carril.
- Paseo de las Acacias, tres carriles, uno de ellos reservado a transporte público.
- Calle de Toledo, tres carriles.
- Paseo Imperial, dos carriles.

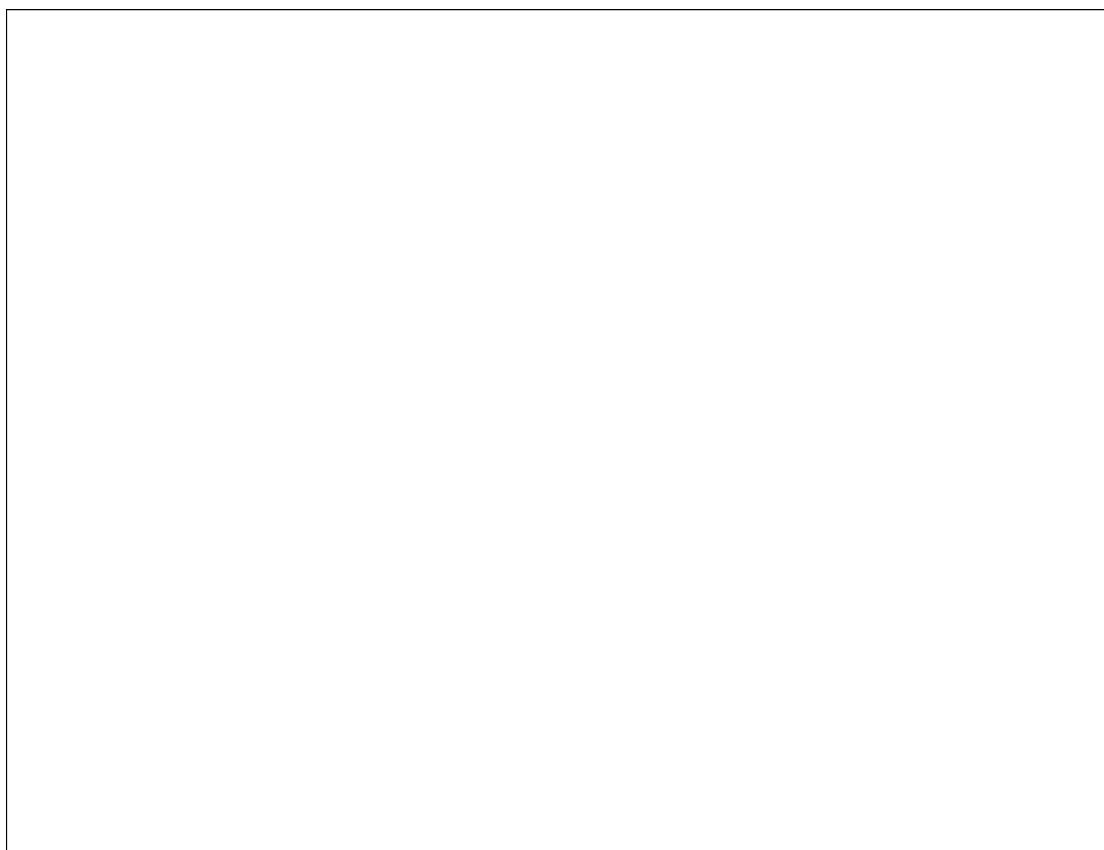
Las vías de salida son:

- Paseo de las Acacias, tres carriles, uno de ellos reservado a transporte público.
- Calle de Toledo, tres carriles.
- Paseo Imperial, dos carriles.
- Calle Alejandro Dumas, tres carriles.
- Paseo de las Yererías, un carril.

### *Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.*

Estas vías son importantes ya que cada una de ellas corresponderá a un centroide de entrada o de salida, donde las entradas serán fuentes de vehículos, y las salidas sumideros.

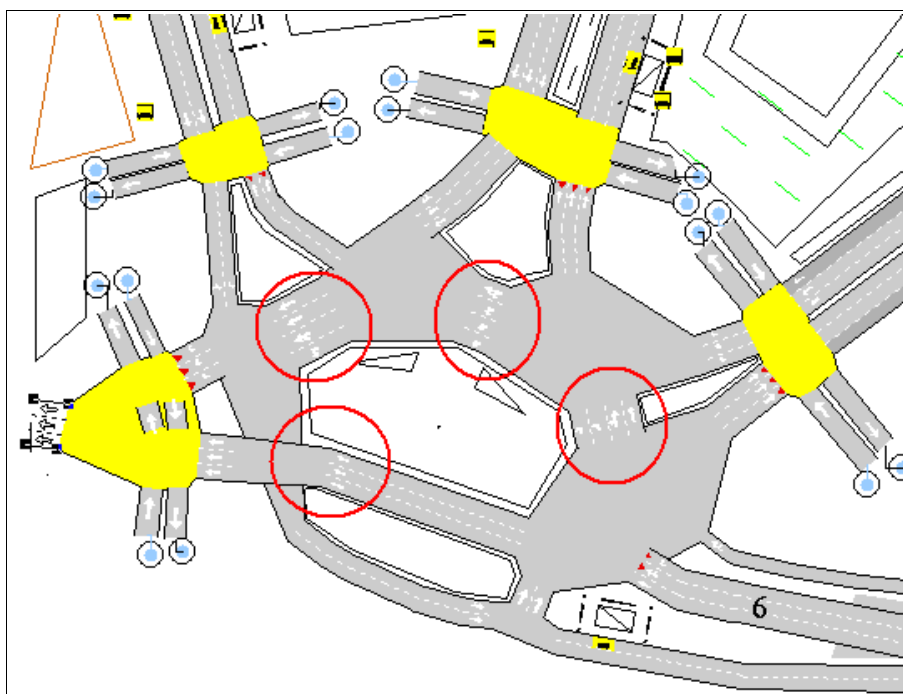
Para la realización del modelo geométrico a escala se ha podido disponer de un plano de la zona proporcionado por el Excelentísimo Ayuntamiento de Madrid, figura 6.1.2. En el plano, se pueden ver las rutas más habituales de los coches. Sin embargo, no aparecen otros detalles importantes como el número de carriles, los giros permitidos, los pasos de peatones, o la ubicación de las señales de tráfico, por lo que fue necesaria una visita a la zona para la obtención de estos datos.



*Figura 6.1.2: Plano de la glorieta de las Pirámides.*

## 6.2. INTERSECCIONES Y GIROS PERMITIDOS.

Para modelar los tramos rectos sin cambio de dirección se utiliza la herramienta *section* del editor TEDI. Una vez que se han dibujado todas las secciones rectas se debe especificar cómo son las uniones de estos tramos entre sí, así como los giros permitidos en cada una de estas uniones. Para esta tarea se utiliza la herramienta *junction*. Se debe tener en cuenta que, a pesar de tratarse de una glorieta, que por definición es una intersección, al estar gobernada por semáforos, es necesario considerar que está compuesta por algunas secciones rectas para poder introducir semáforos. La explicación es que en las intersecciones, *junctions*, GETRAM sólo permite colocar señales viarias a la entrada y a la salida de las mismas, pero no en su interior. Esto se da en los tramos marcados en la figura 6.2.1.

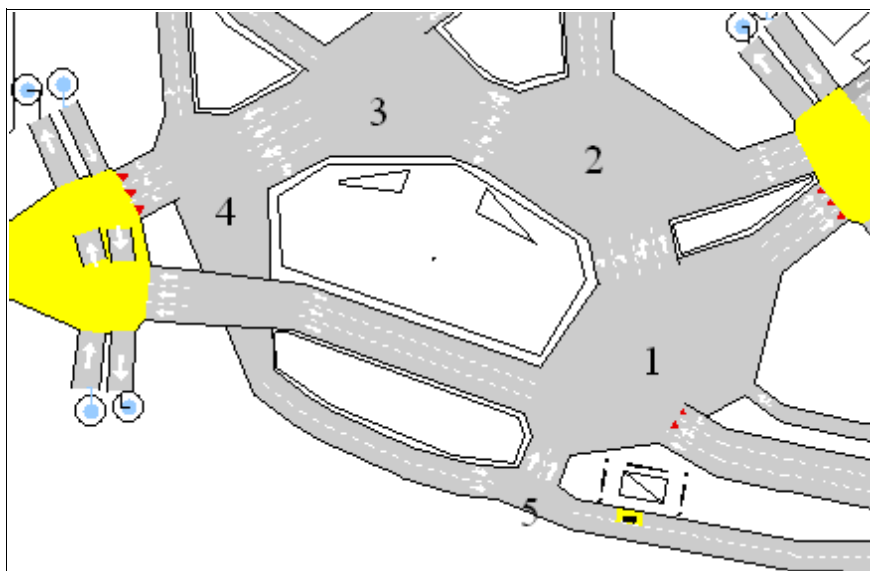


*Figura 6.2.1: Tramos rectos en el interior de la glorieta.*

Además estas secciones son necesarias para que la glorieta tenga forma de anillo, ya que de otra forma GETRAM dibujaría una línea recta entre una entrada y una salida, por ser el camino más corto entre dos puntos.

A la hora de crear una intersección se debe indicar para cada carril de “entrada” los posibles carriles de “salida”, así como los giros controlados por un mismo grupo semafórico, en caso de que exista algún tipo de control. Sobre aspectos relacionados con el control y los semáforos se hablará en el apartado de introducción a los semáforos.

A continuación se va a detallar cada una de las cinco intersecciones de la glorieta de las Pirámides. En la figura 6.2.2 aparece una imagen con la numeración de cada una de estas intersecciones.

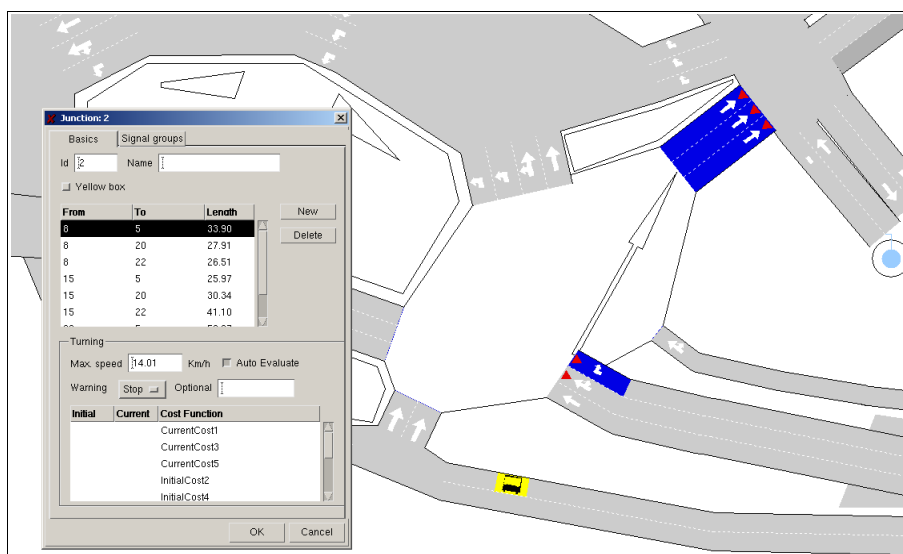


*Figura 6.2.2: Numeración de las intersecciones.*

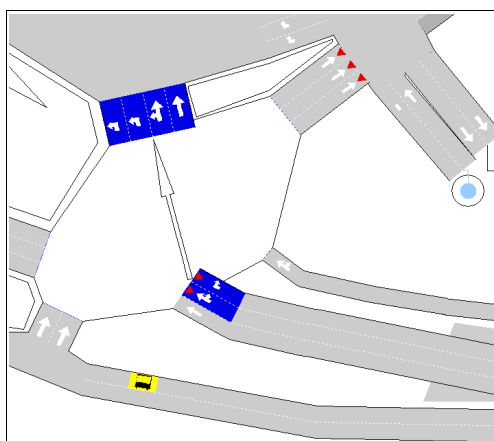
## **6.2.1. Intersección 1.**

Para modelar el tráfico de esta intersección se han añadido dos cedas el paso “*yield*” en los carriles de salida de la M30 por donde los vehículos pudieran girar hacia el paseo de las Acacias. Se ha elegido este modelado debido a que el semáforo gobernaba simultáneamente a los vehículos tanto de la M30 como a los del paseo de las Yererías. Los vehículos provenientes de la M30 cedían el paso a los que llegaban del paseo de las Yererías independientemente de si iban girar o no, llegando en ocasiones a detenerse por falta de visibilidad. Se pueden ver los giros permitidos y el ceda el paso para los giros con entrada por la M30 en las figuras, 6.2.3, 6.2.4 y 6.2.5

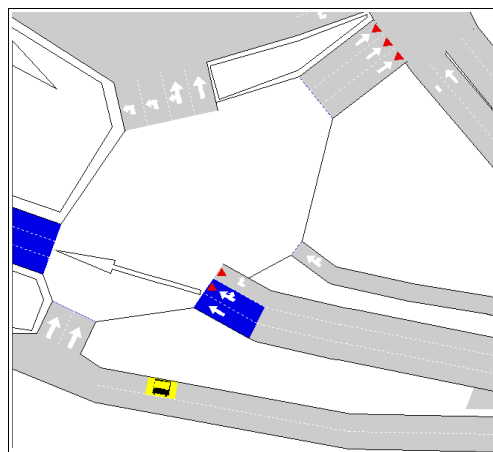




*Figura 6.2.3: Entrada por la M30 y salida por el paseo de las Acacias.*



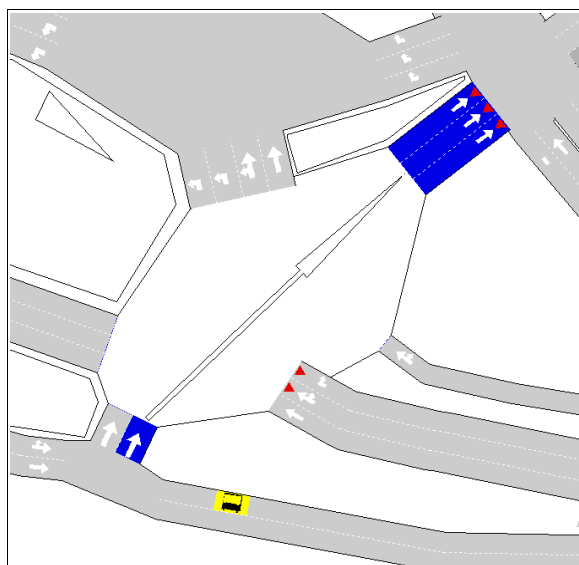
*Figura 6.2.4: Entrada por la M30 y salida hacia la Intersección 2.*



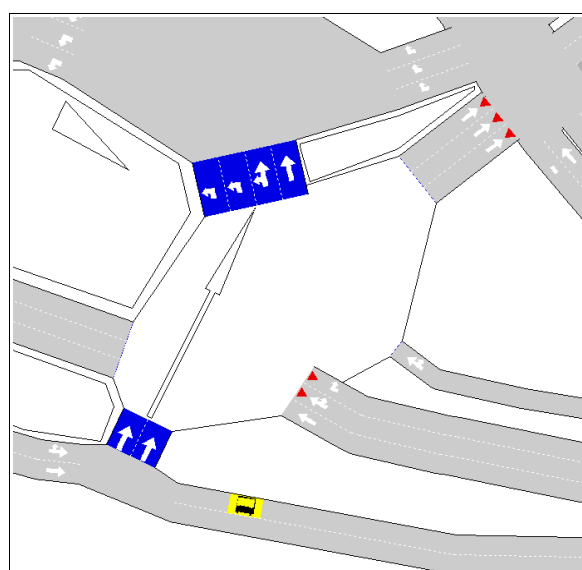
*Figura 6.2.5: Entrada por la M30 y salida por la Intersección 4.*

El resto de giros de esta intersección se muestran en las siguientes figuras. Tienen como entradas el paseo de los Pinos y el paseo de las Yeserías y como salidas el paseo de las Acacias y la sección que une la intersección 1 con la 2.

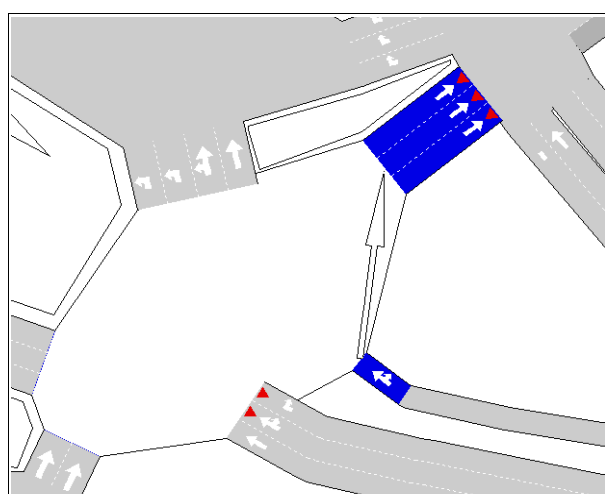




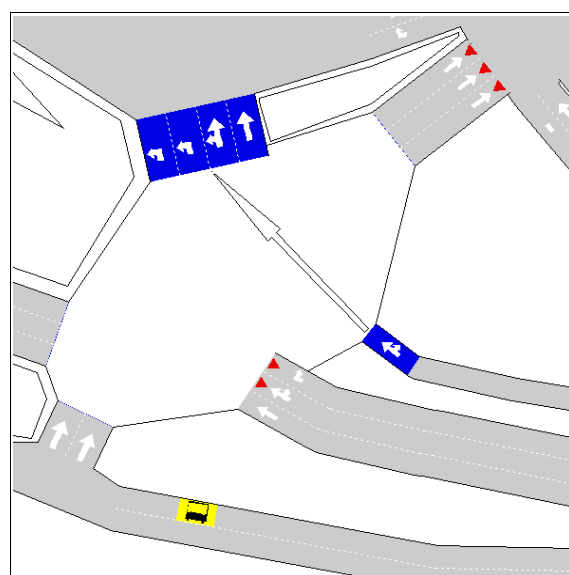
*Figura 6.2.6: Entrada por el paseo de los Pinos y salida por el paseo de las Acacias.*



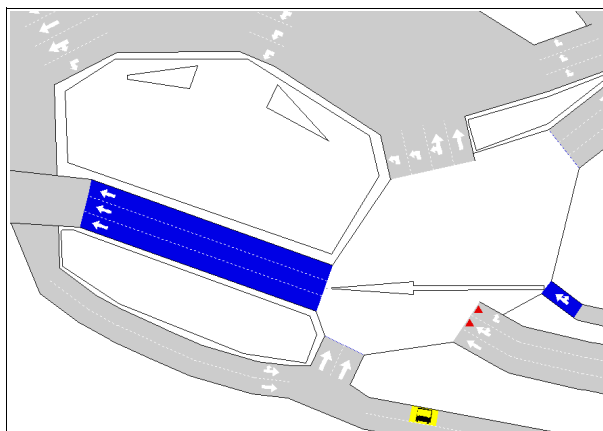
*Figura 6.2.7: Entrada por el paseo de los Pinos y salida hacia la Intersección 2.*



*Figura 6.2.8: Entrada por el paseo de las Yserías y salida por el paseo de las Acacias.*



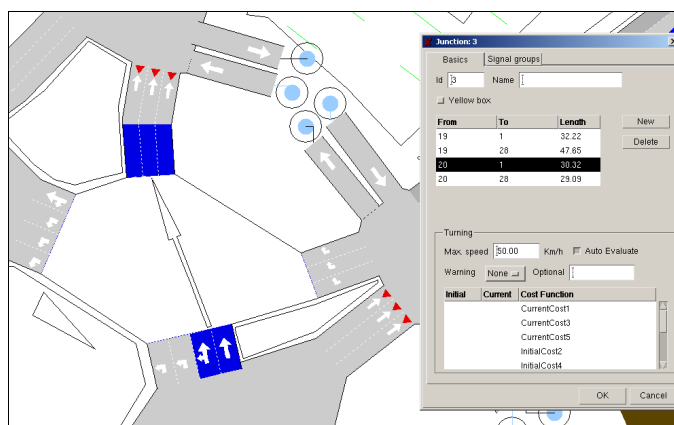
*Figura 6.2.9: Entrada por el paseo de las Yserías y salida hacia la intersección 2.*



*Figura 6.2.10: Entrada por el paseo de las Yeserías y salida por la intersección 4.*

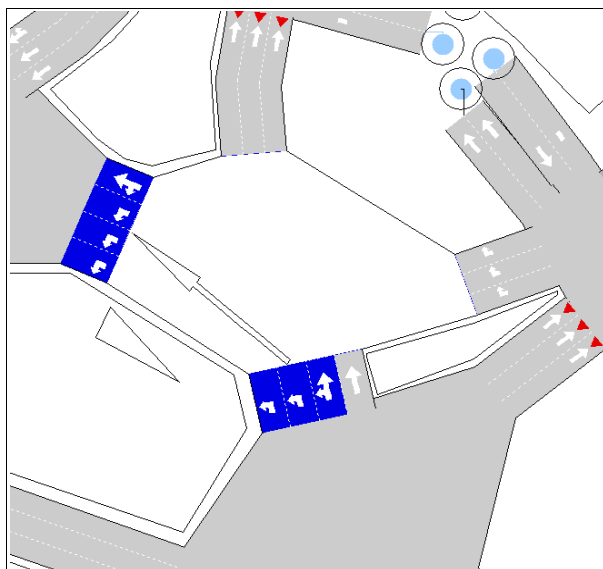
## 6.2.2. Intersección 2.

En esta intersección se puede ver con más detalle la utilización de las cuatro secciones rectas dentro de la glorieta. Entre la intersección 1 y 2 existe un semáforo que controla el flujo de vehículos, por lo que para separarlas, y poder utilizar el control del semáforo es necesario crear una sección que las divida. El primer giro permitido por esta esta sección aparece en la figura 6.2.11, sería salir por la calle de Toledo.



*Figura 6.2.11: Movimiento desde la Intersección 1 hacia la calle de Toledo.*

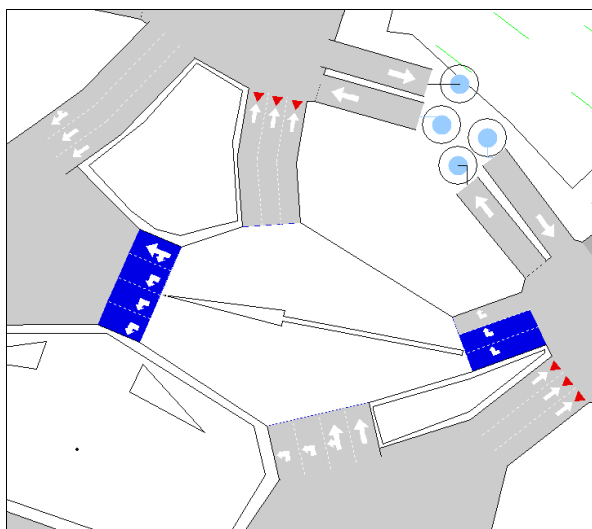
El segundo posible giro sería continuando por la glorieta, como aparece en la figura 6.2.12, hasta la otra sección del interior de la glorieta.



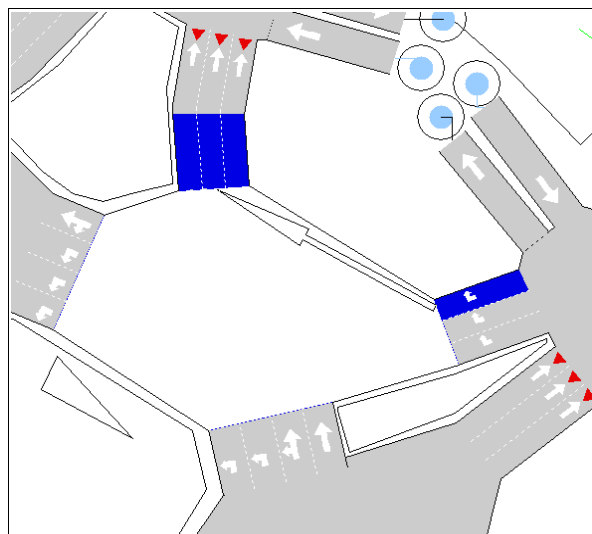
*Figura 6.2.12: Giro de continuación por la glorieta de las Pirámides desde la Intersección 1.*

Sin estas dos secciones hubiese sido imposible gobernar el interior de la glorieta mediante semáforos, además de perder la forma circular.

Entrando por el paseo de las Acacias la intersección permite dos giros: o bien atravesar la glorieta, como aparece en la figura 6.2.13, o bien subir por la calle de Toledo, figura 6.2.14.



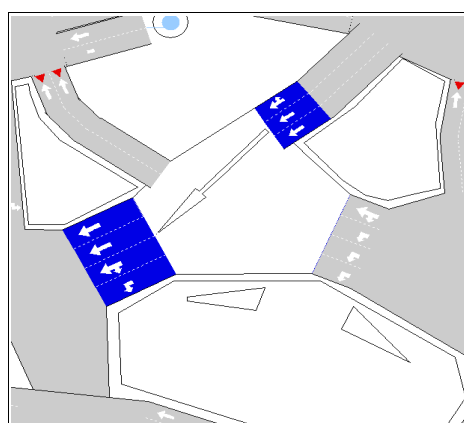
*Figura 6.2.13: Entrada por el paseo de las Acacias posible giro 1.*



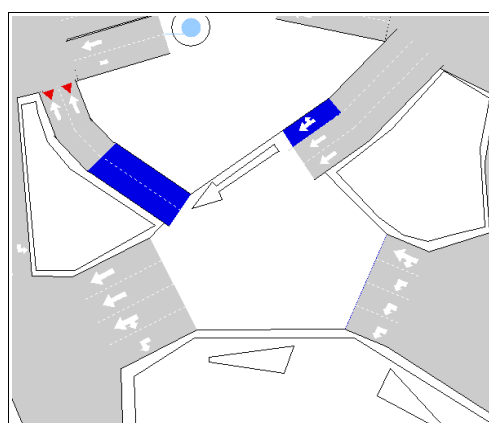
*Figura 6.2.14: Entrada por el paseo de las Acacias posible giro 2.*

### 6.2.3. Intersección 3.

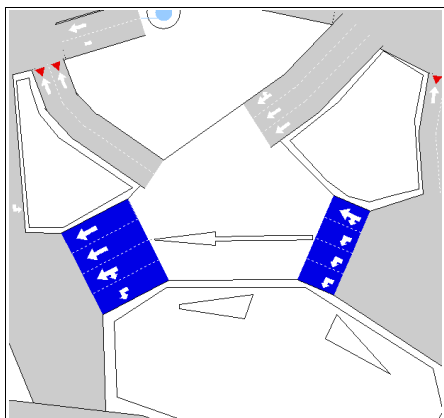
En esta intersección concurren la entrada por la calle de Toledo, la salida por el paseo Imperial y una entrada y una salida de dos secciones internas de la glorieta de las Pirámides, que como en el caso de la intersección anterior están gobernadas por semáforos. Los giros permitidos se muestran en las siguientes imágenes.



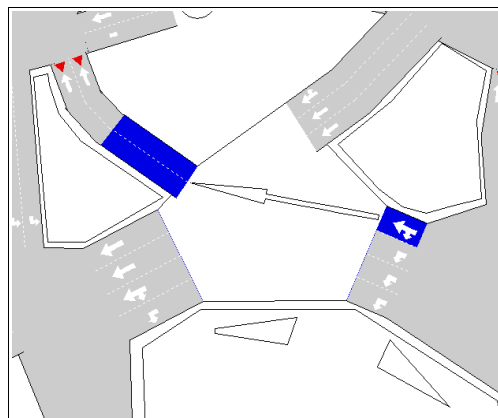
*Figura 6.2.15: Entrada por la calle de Toledo posible giro 1.*



*Figura 6.2.16: Entrada por la calle de Toledo posible giro 2.*



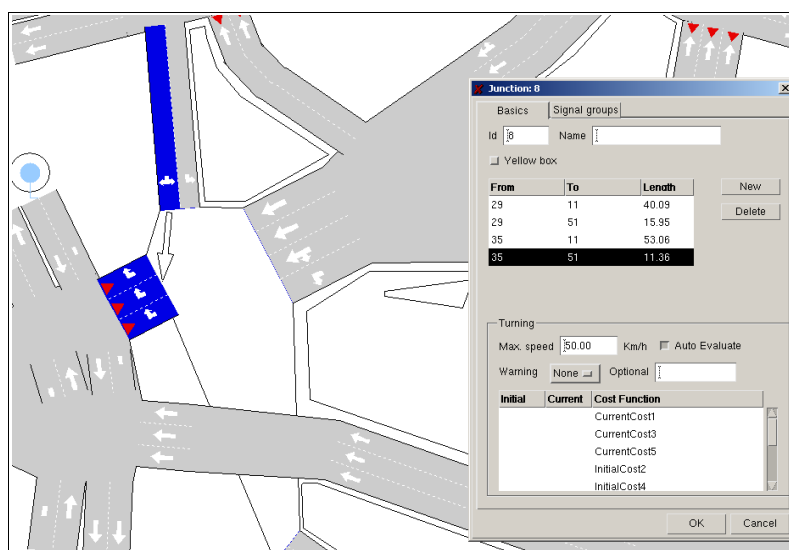
*Figura 6.2.17: Desde la Intersección 2 hacia la Intersección 4.*



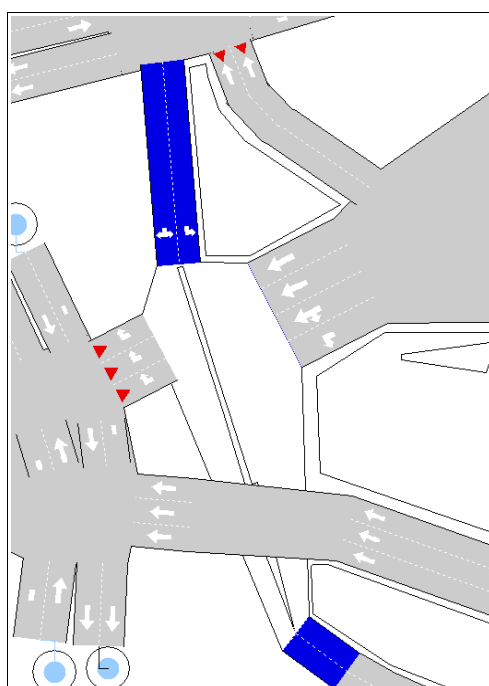
*Figura 6.2.18: Desde la Intersección 2 hacia el paseo Imperial.*

#### **6.2.4. Intersección 4.**

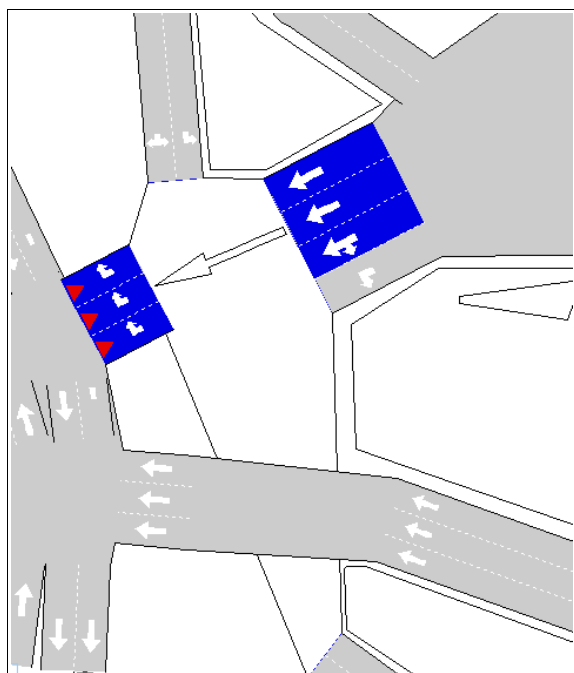
Esta intersección tiene como entradas el paseo Imperial y dos de las secciones de la glorieta de las Pirámides, una proveniente de la intersección 1 y otra de la intersección 3. Las salidas son los dos ramales de la calle Alejandro Dumas y el paseo de los Pinos situado en la parte inferior de la glorieta. Los giros permitidos por cada entrada son los que se muestran en las figuras siguientes.



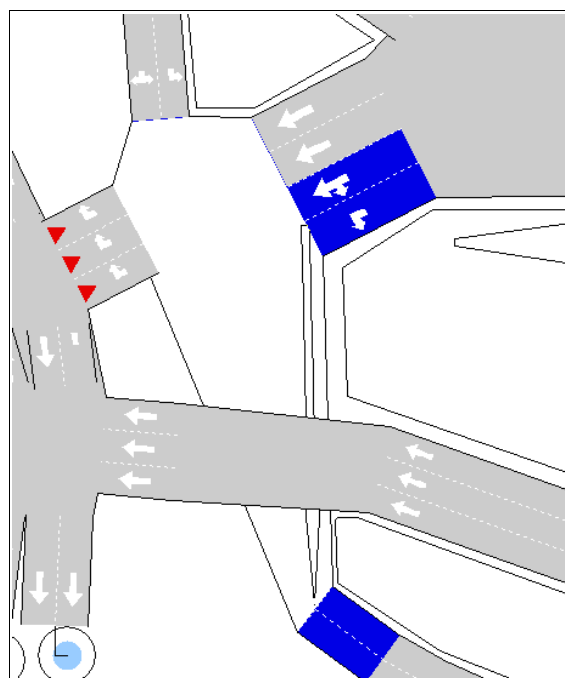
*Figura 6.2.19: Entrada por el paseo Imperial y salida por la calle de Alejandro Dumas.*



*Figura 6.2.20: Entrada por el paseo Imperial y salida por el paseo de los Pinos.*

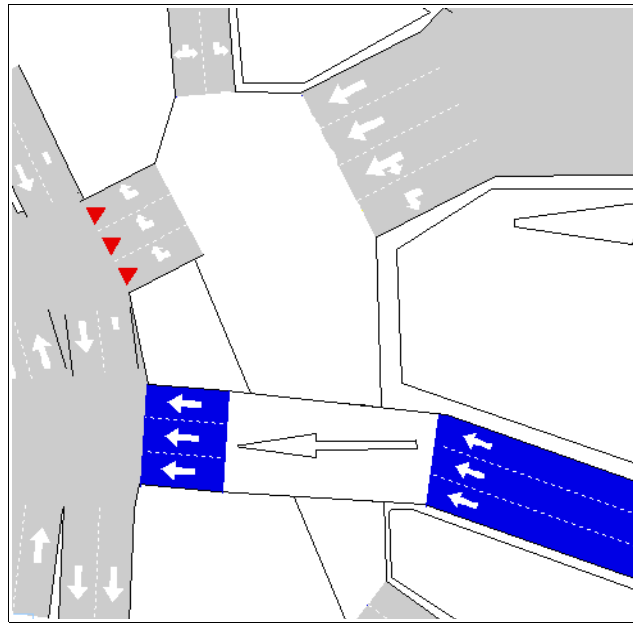


*Figura 6.2.21: Movimiento desde la Intersección 3 hacia la calle de Alejandro Dumas.*



*Figura 6.2.22: Movimiento desde la Intersección 3 hacia el paseo de los Pinos.*

El giro entre la sección que viene de la intersección 1 y la salida de Alejandro Dumas tiene ciertas peculiaridades. Como se puede ver en la figura 6.2.23, el giro no se encuentra dentro de la misma intersección que el resto de giros de esta intersección, si no que parece que cruza por encima de ésta.



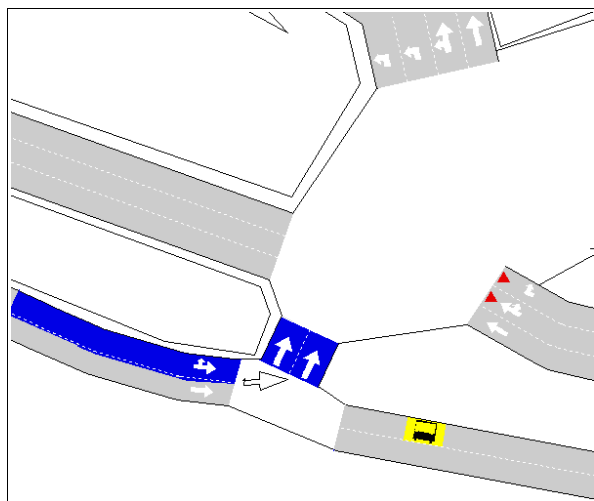
*Figura 6.2.23: Movimiento desde la Intersección 1 hacia la calle de Alejandro Dumas.*

Efectivamente desde el punto de vista de GETRAM se trata de dos intersecciones, *juntions*, diferentes, pero desde el punto de vista funcional es una sola, y por eso ambas conforman la intersección 4. La razón de este modelado es que si este giro hubiese pertenecido a la misma *juntion*, la intersección hubiera quedado deformada geométricamente respecto a la realidad. Esto quiere decir que el recorrido de los vehículos era más corto y más favorable a lo que resulta ser en la práctica. Se optó por añadir otra *juntion* y no un tramo recto, *section*, para mantener la forma de anillo, ya que estos últimos no pueden ser atravesados transversalmente y el giro hacia el paseo de los pinos no hubiera sido posible.

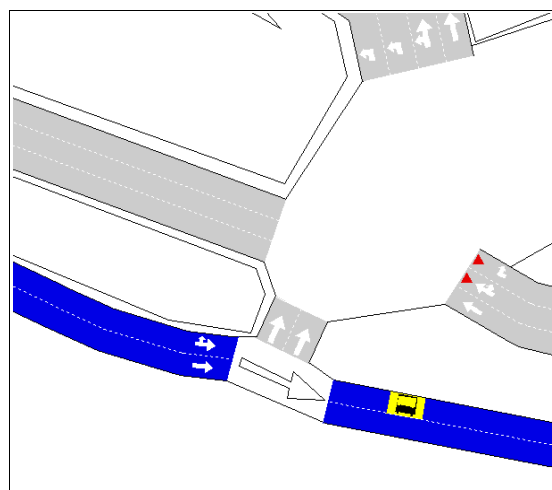


## 6.2.5. Intersección 5.

Esta última intersección conecta el paseo de los Pinos con la glorieta de las Pirámides por la intersección 1, cerrando así una vuelta completa, figura 6.2.24; y con la salida del paseo de las Yaserías, figura 6.2.25.



*Figura 6.2.24: Entrada por el paseo de los Pinos y salida por la Intersección 1.*



*Figura 6.2.25: Entrada por el paseo de los Pinos y salida por el paseo de las Yaserías.*

Con este último giro concluye el análisis de todos los movimientos permitidos dentro de la glorieta. Es importante indicar correctamente los giros posibles de cada intersección y no olvidarse de ninguno de ellos, ya que, para indicar la ruta de los vehículos el usuario sólo indica al programa su entrada y su salida, y es el propio GETRAM quien realiza de forma automática el camino más corto y posible de acuerdo a los giros que se le ha permitido que realice.

## **6.3. INTRODUCCIÓN A LOS CICLOS SEMAFÓRICOS.**

Antes de explicar cómo se introducen los ciclos semafóricos en el programa GETRAM se van a definir una serie de términos que son necesarios para comprender el uso y programación de estos semáforos[2].

- Regulador:

Es el elemento encargado de controlar la secuencia de luces verde-ámbar-rojo de un grupo de semáforos de un determinado cruce vial.

- Tiempo de ciclo:

Se define como el tiempo que transcurre desde que el primer semáforo se pone en verde, y pasando por ámbar y rojo, vuelve a ponerse en verde, siempre y cuando el resto de semáforos hayan completado su propio ciclo.

- Fase:

Con este término se hace referencia a cada una de las combinaciones de los distintos semáforos que permiten uno o varios movimientos simultáneos. El número de fases del cruce debe ser tal que permita todos los movimientos de vehículos durante un ciclo. El cometido de las fases es separar el verde de los movimientos incompatibles, por ejemplo, no puede estar en verde el semáforo del carril de una calle a la vez que su semáforo de peatones.

- Fases Intermedias:

Reciben este nombre los tiempos muertos existentes desde que un semáforo se pone en rojo hasta que el siguiente de la secuencia se pone en verde. Son intervalos en los que no se permite la entrada de ningún vehículo en la intersección a fin de que exista tiempo suficiente para despejarla antes del siguiente paso de vehículos. También se denominan interfases.

- Despeje

Es el tiempo necesario para que los vehículos que han accedido a una intersección salgan de ella por alguna de las calles que lo permitan.

- Grupo semafórico:

Se define así a cada uno de los semáforos que tienen la misma secuencia de colores dentro de un mismo cruce. La secuencia de estado de cada grupo semafórico queda reflejada en un gráfico que se conoce como diagrama de fases de cruce.

En las ciudades los sistemas más modernos de control del tráfico incorporan una gran cantidad de elementos como detectores, semáforos y reguladores. La incorporación de los ordenadores a esta rama de la ingeniería ha permitido aplicar sofisticados métodos de control capaces de modificar, en tiempo real, los tiempos de los cruces en función de las características del tráfico.

El resto del trabajo, consiste en calcular e implementar la duración óptima de las fases en función de las condiciones del tráfico mediante un sistema de control adaptativo que se ejecuta en el ordenador central. Para la glorieta de las Pirámides, el sistema de control es fijo y no admite cambios en tiempo real.

Establecer la duración del ciclo no es sencillo. Hay dos factores contrapuestos para determinar su duración. Por un lado son interesantes tiempos de ciclos altos para disminuir los retrasos debido a las aceleraciones y desaceleraciones provocadas por los cambios de fase de los semáforos. De esta idea se puede extraer que a menor cantidad de ciclos por hora, se acumularán menores pérdidas de tiempo, pero por otro lado los conductores no están mentalmente preparados para ciclos semafóricos muy altos.

Se hace necesario encontrar una solución de compromiso entre estos dos factores, siendo el factor dominante la paciencia de los conductores.

Con la programación de bajas duraciones por ciclo, se reducen los tiempos de espera por parte de los conductores, pero esto penaliza a la red viaria con una disminución de su capacidad. Habitualmente se programan ciclos comprendidos entre los 35 y los 100 segundos. Menores de 35 segundos, resultan muy ineficientes para la red y superiores a 100 segundos no son convenientes para los conductores.

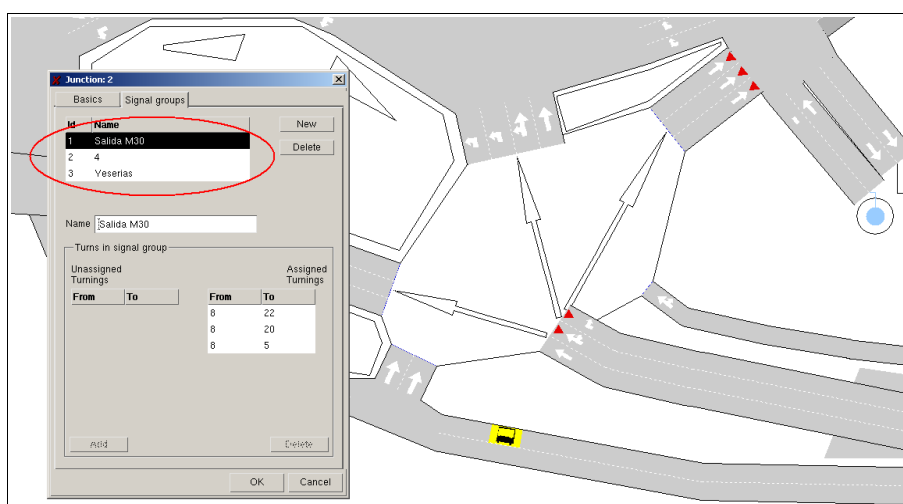
Con frecuencia se recurre a repartir de manera proporcional el ciclo en función de la intensidad de cada una de las vías. Pero si se quiere optimizar más en el cálculo de la duración de cada una de las fases existen una serie de requisitos básicos que se enumeran a continuación:

- El número de fases debe ser lo menor posible. Esto se debe a la reducción de los tiempos muertos de las fases intermedias.
- El recorrido dentro de la intersección debe ser lo más corto posible, así se consigue minimizar los tiempos de despeje.
- El número de movimientos simultáneos debe ser máximo.
- Cuando un ciclo se divide en más de dos fases es necesario considerar el orden en que se producen, ya que ello influye en la seguridad y el rendimiento de la intersección.

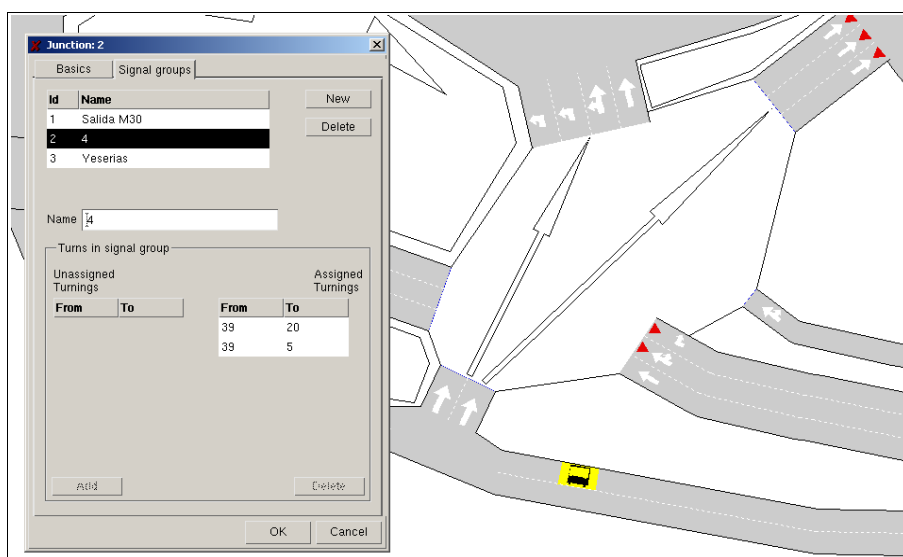
### *Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.*

- Cuando durante la fase de peatones, tanto el número de éstos como el de vehículos que tratan de salir de la intersección no sea muy elevado, puede permitirse el paso de ambos con preferencia para los peatones. Si uno de los dos movimientos es relativamente importante, se deben considerar fases que los separen completamente, de otro modo podría resultar peligroso para los peatones o producirse colas que bloqueasen la intersección.

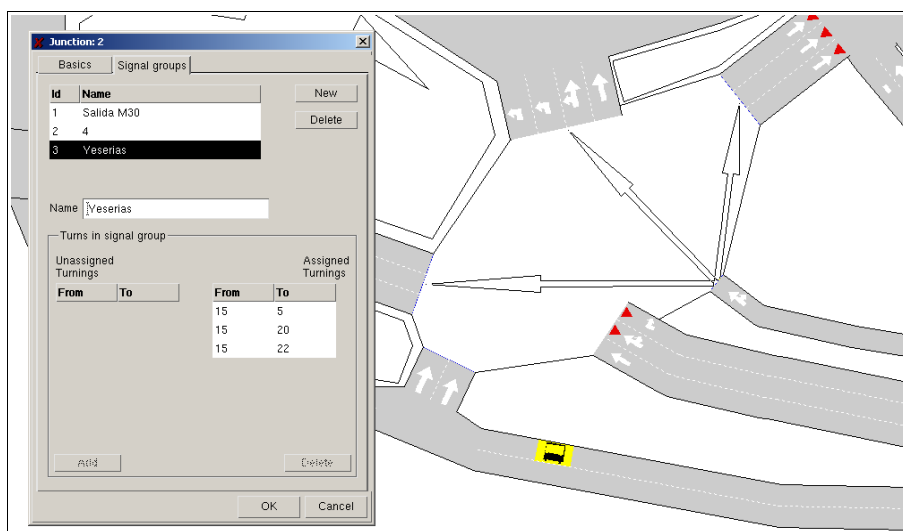
Para la glorieta de las Pirámides existe un único regulador con un ciclo de duración fijado a 110 segundos para todas las señales semafóricas. Para cada intersección se determinarán los giros permitidos asociados a un semáforo en concreto. Como puede verse en las imágenes a continuación, para la intersección 1 se han dividido en tres grupos de giros permitidos, y cada uno de estos grupos está controlado por un semáforo.



*Figura 6.3.1: Primer grupo de señales de la Intersección 1.*



*Figura 6.3.2: Segundo grupo de señales de la Intersección 1.*



*Figura 6.3.3: Tercer grupo de señales de la Intersección 1.*

El siguiente paso es crear un plan de control donde se determina si cada intersección está no regulada (por defecto) o regulada. Para el caso que nos atañe, todas las intersecciones están reguladas, y además, por un ciclo fijo. Para cada intersección se debe señalar el número de fases, su duración, la duración del ciclo, los movimientos permitidos (indicado por cada grupo de señales), y las posibles fases intermedias.

### Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.

Sobre los ciclos de cada intersección se realizó un trabajo de campo en la zona de estudio cuyos datos obtenidos se resumen en la tabla 6.2.1.

Intersección, grupo semafórico	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
J2.1 J2.2											
J3.1 J3.2											
J4.1 J4.2											
J5.1 J5.2											
J6 J7											

Tabla 6.3.1: Ciclos semafóricos.

Antes de pasar al siguiente paso se deben mencionar algunos aspectos de GETRAM sobre el uso de los semáforos:

- En el plan de control se indica qué grupo de señales se encuentran en color verde y se añade secuencialmente el resto de fases
- La opción *yellow time* que hace referencia a la luz ámbar en nuestro caso es 3 segundos.
- El tiempo de ámbar se añade posteriormente al periodo total de luz verde. Por tanto, si una señal dura 10 segundos de verde, estará 13 segundos hasta cambiar a rojo si el *yellow time* es de 3 segundos.

## 6.4. INTRODUCCIÓN A LOS AFOROS.

Para el presente estudio, se eligió como manera de introducir los datos referentes a las intensidades horarias de vehículos, el uso de la matriz O/D. Los datos fueron proporcionados por el Excelentísimo Ayuntamiento de Madrid y se recogen en el Anexo I. En la tabla 6.4.1 se puede ver la numeración elegida para las entradas y salidas de la glorieta de las Pirámides, necesaria para indicar a los vehículos su origen y su salida en la matriz O/D.

Numeración	Sentido	Calle
1	Entrada	M30
2	Entrada	Paseo de Yeserías
3	Salida	Paseo de las Acacias
4	Entrada	Paseo de las Acacias
5	Entrada	Paseo Imperial
6	Salida	Paseo Imperial
7	Salida	Alejandro Dumas
8	Salida	Paseo de Yeserías
9	Entrada	Calle de Toledo
10	Salida	Calle de Toledo

*Tabla 6.4.1: Numeración de entradas y salidas.*

Se va a realizar un estudio previo de los aforos para determinar parámetros importantes como la composición del tráfico, la hora punta de afluencia de tráfico, el número total de vehículos, etc. Atendiendo a los datos obtenidos con la colaboración del Excelentísimo Ayuntamiento de Madrid, resumidos en la tabla 6.4.2, se pueden ir sacando conclusiones previas al estudio de simulación.

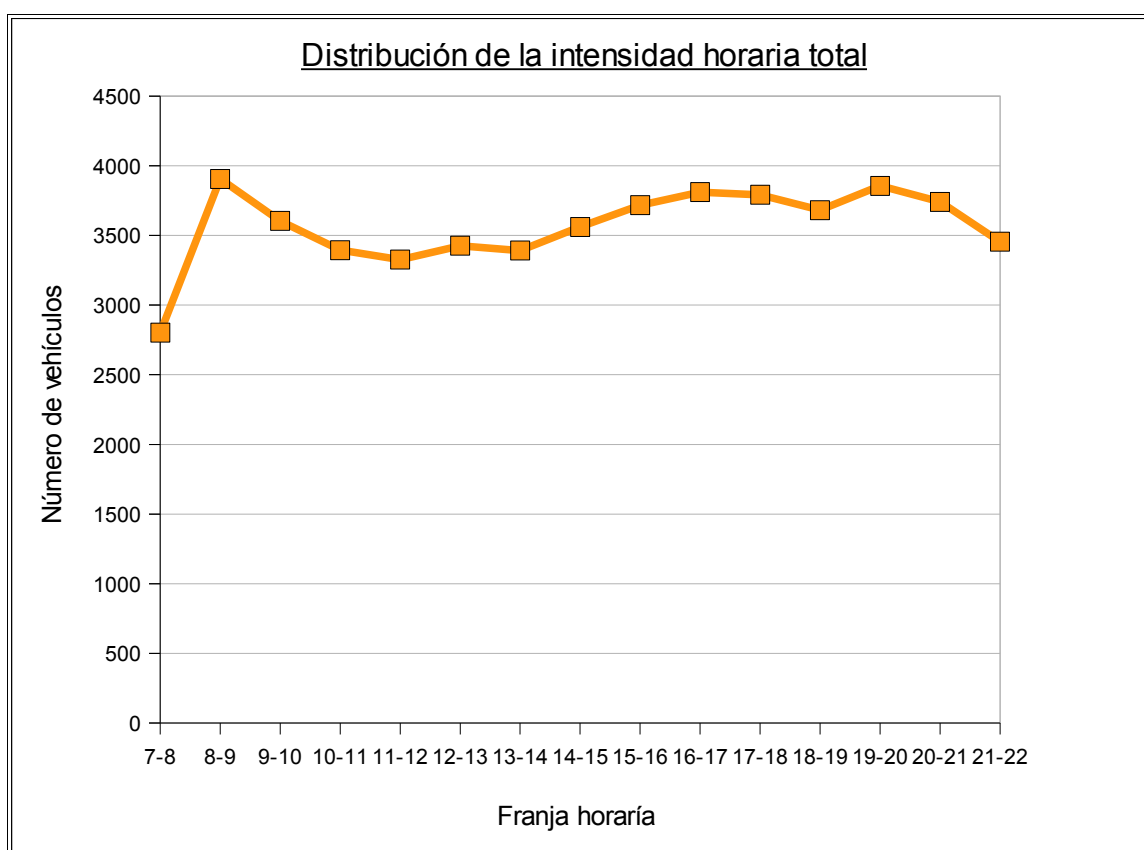
***Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.***

DE:	A:	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	
1	3	417	515	513	448	318	311	319	425	445	449	459	426	473	464	433	6415
1	6	109	221	162	169	154	186	155	136	150	165	161	134	189	134	111	2336
1	7	554	608	491	572	672	674	731	799	922	915	858	833	857	839	951	<b>11276</b>
1	10	389	463	511	479	445	476	491	458	412	512	486	518	545	552	490	7227
2	3	51	44	55	59	47	40	41	61	47	45	63	57	50	50	50	760
2	6	85	127	113	99	77	102	101	101	91	77	87	64	82	55	44	1305
2	7	91	105	113	87	77	48	58	73	84	101	91	80	72	65	81	1226
2	10	147	153	152	138	122	107	122	116	88	87	92	86	109	86	51	1656
4	6	34	104	73	43	53	50	41	42	43	37	40	49	32	33	31	705
4	7	353	697	500	495	525	571	459	413	475	508	455	449	457	539	453	7349
4	8	27	45	78	62	59	66	79	70	50	54	59	59	60	86	33	887
4	10	17	16	28	25	27	26	17	11	8	16	18	19	23	16	18	285
5	3	50	59	64	49	73	58	37	50	57	49	41	45	41	42	25	740
5	7	107	168	168	136	139	141	139	154	187	175	162	174	138	128	136	2252
5	8	89	153	165	144	133	131	127	140	141	162	170	189	204	172	139	2259
5	10	9	9	10	14	15	4	4	12	14	16	18	29	17	14	6	191
9	3	20	21	23	17	20	18	18	25	23	25	20	23	25	12	15	305
9	6	38	54	48	38	30	27	28	27	19	20	39	31	48	48	33	528
9	7	157	232	243	243	257	290	291	324	330	282	344	298	327	316	255	4189
9	8	58	112	94	77	84	100	134	124	131	116	129	119	107	90	100	1575
		2802	<b>3906</b>	3604	3394	3327	3426	3392	3561	3717	3811	3792	3682	3856	3741	3455	<b>53466</b>

*Tabla 6.4.2: Intensidades horarias del total de los vehículos.*

Para empezar, el tráfico que circula a través de la intersección completa es de casi 55000 vehículos por día. El recorrido más utilizado va desde la entrada por la M30, hasta la salida por Alejandro Dumas, con un total de 11276 vehículos por día. Para poder ver mejor la distribución de las intensidades a lo largo del día se ha elaborado la gráfica de la figura 6.4.1.





*Figura 6.4.1: Intensidades horarias del total de los vehículos.*

Esta gráfica representa las intensidades totales de vehículos que atraviesan la intersección en intervalos de una hora. Se puede ver que la hora punta, en la cual circulan más coches, resulta ser el intervalo de 8 de la mañana a 9, hora que coincide con los desplazamientos para ir al trabajo de la mayoría de las personas. La media de los vehículos que atraviesan la glorieta por hora es de 3564 vehículos con una desviación típica de 190 vehículos en el rango horario de 8 de la mañana a 10 de la noche. Esta desviación, de manera porcentual, no supone más que un 5%, por lo que se puede considerar que la intensidad horaria es relativamente constante.

## Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.

El tráfico se ha dividido en 5 tipos: vehículos ligeros, pesados, taxis, autocares y motos.

Para los vehículos ligeros las intensidades horarias están recogidas en la tabla 6.4.3.

DE	A	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	
1	3	296	355	354	295	220	206	228	338	329	335	328	333	398	370	332	4717
1	6	95	190	124	138	117	150	130	109	119	129	134	109	167	114	100	1925
1	7	506	532	416	500	574	590	636	694	797	754	723	702	733	714	803	9674
1	10	267	281	322	317	288	313	339	327	287	364	328	388	401	407	369	4998
2	3	29	26	36	41	39	28	31	45	35	31	43	33	33	30	39	519
2	6	71	96	73	65	45	63	72	76	67	61	68	56	73	52	43	981
2	7	44	64	85	70	57	40	48	55	63	71	67	63	57	54	61	899
2	10	111	106	116	92	82	64	80	78	53	56	68	60	86	67	41	1160
4	6	24	70	44	25	29	34	28	31	36	32	31	39	26	27	22	498
4	7	292	598	415	379	385	407	331	309	362	396	349	318	355	434	351	5681
4	8	22	33	59	49	48	53	66	65	49	50	54	49	58	78	31	764
4	10	7	9	19	16	14	15	9	8	6	11	10	14	10	12	11	171
5	3	41	42	47	37	55	46	31	37	46	41	34	38	37	34	25	591
5	7	96	147	141	105	107	107	112	128	163	150	130	143	114	104	111	1858
5	8	65	121	134	115	106	99	111	118	115	138	137	163	179	147	125	1873
5	10	7	7	7	8	15	4	3	9	12	13	15	26	13	14	6	159
9	3	16	17	14	14	18	11	10	21	17	16	15	17	17	10	15	228
9	6	27	47	39	28	23	20	18	21	15	12	33	19	41	40	29	412
9	7	87	151	121	96	88	97	111	123	127	102	135	124	140	122	124	1748
9	8	44	87	68	54	47	66	83	81	95	74	87	88	82	72	80	1108
		2147	2979	2634	2444	2357	2413	2477	2673	2793	2836	2789	2782	3020	2902	2718	39964

Tabla 6.4.3: Intensidades horarias de los vehículos ligeros.

Representando el número total de vehículos que pasan para cada intervalo de una hora, se obtiene la figura 6.4.2.

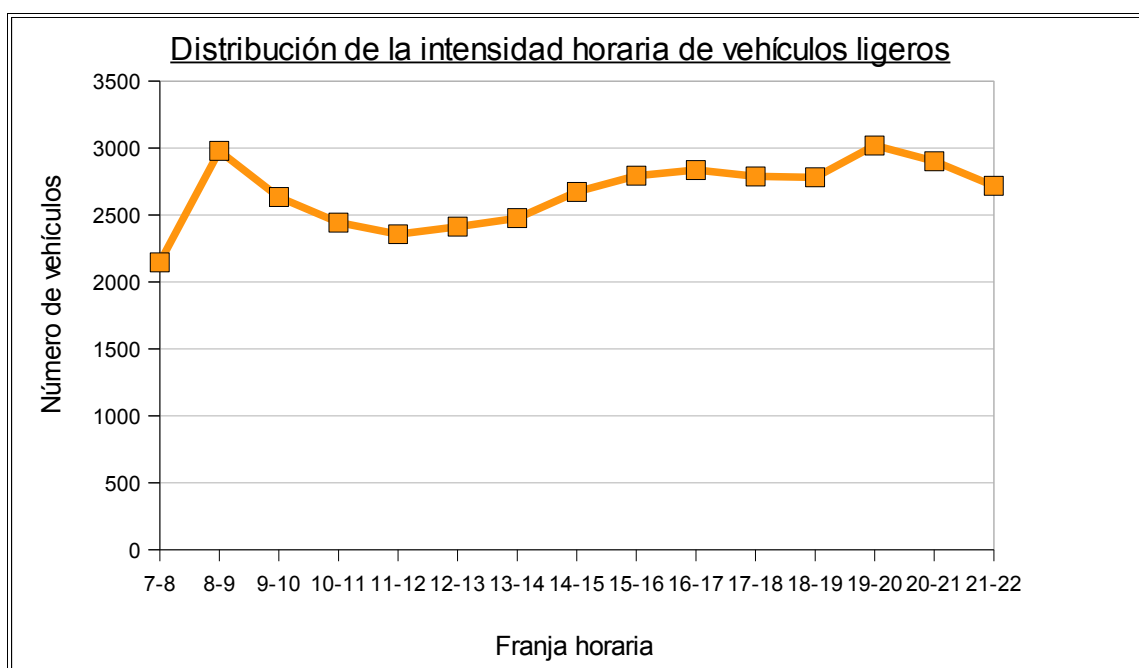


Figura 6.4.2: Intensidades horarias de los vehículos ligeros.

### Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.

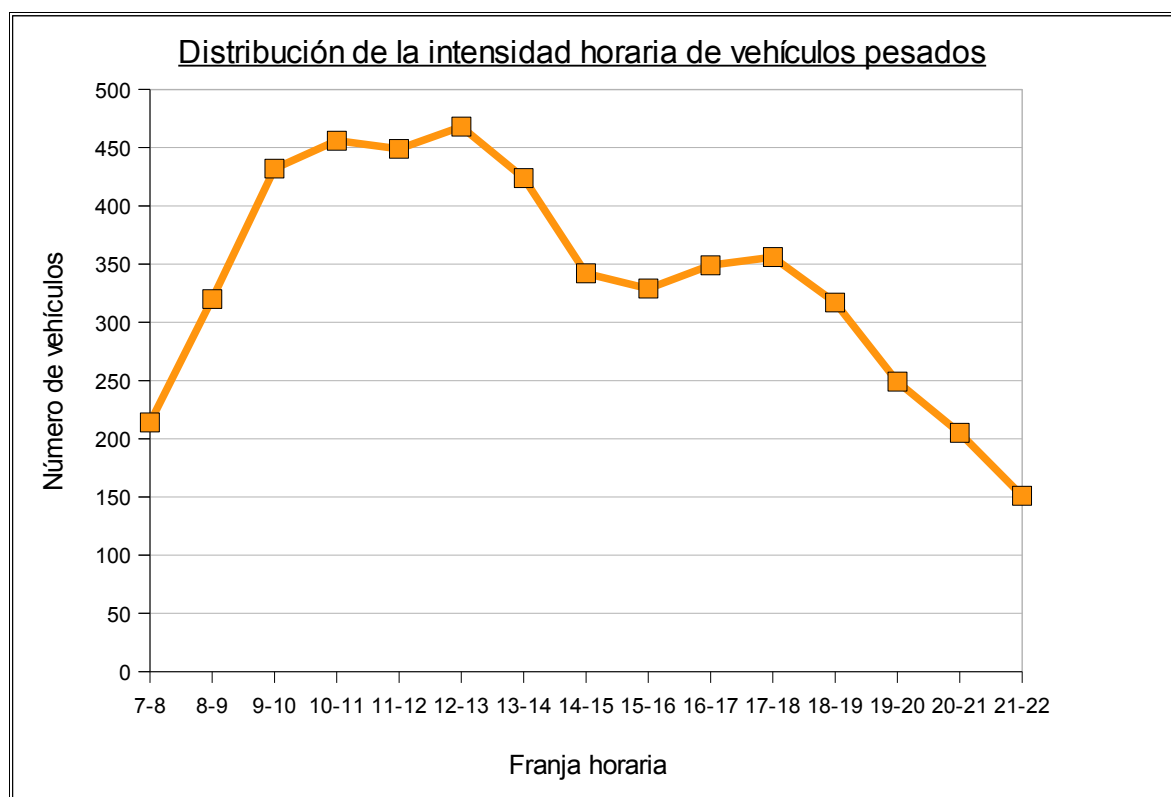
Se puede ver que la distribución horaria de vehículos ligeros también resulta ser relativamente constante, salvo en el primer intervalo de tiempo, que pasa de apenas 2000 vehículos a casi 3000, un 50% más. Como suele ser habitual en las ciudades, los otros 2 intervalos de intensidad horaria máxima coinciden con la salida de los colegios, de 5 a 6 de la tarde, y con la salida del trabajo, de 8 a 9 de la noche.

Para los vehículos pesados sus datos aparecen e la tabla 6.4.4:

DE:	A:	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	
1	3	16	21	31	37	20	32	26	20	31	34	36	23	16	18	10	661
1	6	7	19	25	20	26	22	17	18	13	25	19	17	11	14	9	262
1	7	30	42	51	43	69	50	61	53	67	85	71	69	57	53	64	865
1	10	25	57	81	77	62	62	60	45	36	40	30	29	22	24	11	661
2	3	4	2	8	6	3	4	2	5	2	3	4	4	3	1	0	51
2	6	10	15	29	23	23	22	16	12	15	10	12	8	6	0	1	202
2	7	13	9	11	8	13	6	4	6	9	11	8	7	6	3	7	121
2	10	8	10	10	16	10	14	10	12	10	9	8	5	5	2	0	129
4	6	3	14	9	7	7	4	4	1	3	1	4	3	0	1	0	61
4	7	22	35	37	49	58	64	52	35	29	28	27	38	32	24	13	543
4	8	2	5	7	9	7	5	8	4	1	1	1	3	0	4	1	58
4	10	3	2	4	5	3	4	0	0	0	1	0	0	1	0	1	24
5	3	6	4	7	8	5	8	1	3	3	2	4	0	0	0	0	51
5	7	11	15	16	20	21	26	22	16	12	12	19	15	12	10	6	233
5	8	14	20	18	19	19	17	11	6	16	5	19	11	8	8	2	193
5	10	1	0	2	2	0	0	1	0	0	1	2	1	2	0	0	12
9	3	2	1	7	1	0	5	6	1	4	4	2	0	2	0	0	35
9	6	2	5	6	6	5	4	7	4	1	3	2	7	2	3	2	59
9	7	28	34	59	87	86	104	96	87	66	63	76	67	59	38	24	974
9	8	7	10	14	13	12	15	20	14	11	11	12	10	5	2	0	156
		214	320	432	456	449	468	424	342	329	349	356	317	249	205	151	5351

*Tabla 6.4.4: Intensidades horarias de los vehículos pesados.*

Si se representan los vehículos pesados totales que atraviesan la glorieta por intervalo de tiempo se obtiene la figura 6.4.3.



*Figura 6.4.3: Intensidades horarias de los vehículos pesados.*

Este tipo de vehículos si presenta una variación muy significativa en su distribución. Paradojicamente el intervalo con mayor cantidad de vehículos pesados, de 10 de la mañana a una de la tarde, coincide con el periodo de menor cantidad de vehículos totales. Esto permite aliviar la congestión del tráfico, ya que estos vehículos son mas lentos y grandes que las motos o los coches, y su presencia reduce la velocidad media.

Los intervalos con mayor intensidad de vehículos pesados coinciden con el horario habitual de carga y descarga de furgonetas y pequeños camiones, siendo más intenso este reparto por la mañana que por la tarde.

### Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.

En el caso de los taxis los datos numéricos son la tabla 6.4.5, y su representación de taxis totales por hora aparece en la figura 6.4.4.

DE:	A:	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	
1	3	75	84	63	80	41	36	34	36	47	37	49	43	36	44	53	943
1	6	3	5	11	4	7	4	3	4	5	3	6	7	9	6	2	79
1	7	13	19	13	20	20	22	20	27	35	41	37	39	45	53	59	463
1	10	67	62	58	52	58	61	55	49	50	65	86	57	71	80	72	943
2	3	10	6	4	8	3	5	7	5	8	9	13	8	6	12	7	111
2	6	1	4	7	6	4	8	6	8	2	2	4	0	2	1	0	55
2	7	16	17	14	8	5	2	5	7	9	11	8	6	8	7	11	134
2	10	16	18	16	18	16	16	19	13	17	16	10	16	14	12	7	224
4	6	2	5	9	4	6	6	3	1	0	0	0	3	2	1	6	48
4	7	25	27	21	30	47	55	42	38	43	42	46	57	40	45	54	612
4	8	1	2	9	3	2	3	3	1	0	1	3	4	0	4	1	37
4	10	3	3	4	3	9	7	8	3	2	4	8	4	9	4	6	77
5	3	1	6	3	1	9	2	3	6	6	4	2	6	4	8	0	61
5	7	0	2	7	5	7	3	2	6	5	8	7	9	7	10	14	92
5	8	5	4	7	4	3	6	2	5	6	3	5	7	6	4	5	72
5	10	1	2	1	4	0	0	0	3	2	1	1	2	2	0	0	19
9	3	0	2		0	1	2	2	3	1	3	1	4	4	2	0	25
9	6	7	2	2	3	2	3	2	2	3	4	2	5	2	4	2	45
9	7	29	23	31	38	63	68	57	74	85	72	84	57	68	97	73	919
9	8	5	7	4	7	19	13	18	11	17	17	10	15	10	8	12	173
		280	300	284	298	322	322	291	302	343	343	382	349	345	402	384	5132

Tabla 6.4.5: Intensidades horarias de los taxis.

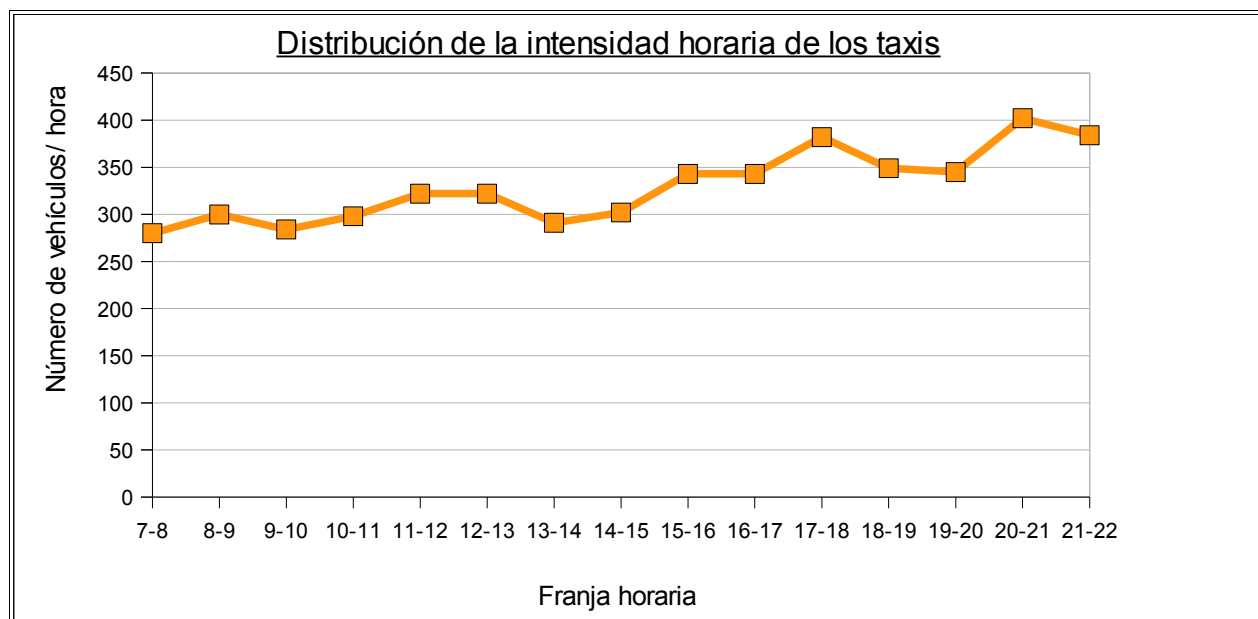


Figura 6.4.4: Intensidades horarias de los taxis

Se puede ver que es una distribución en la que aumenta el número de taxis por hora según se llega al final del intervalo. La razón, posiblemente, sea que se van sumando taxistas a los ya presentes a lo largo del día.

### Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.

Haciendo el mismo estudio para autocares a partir de los datos de la tabla 6.4.7, se obtiene su representación en la figura 6.4.5, con el número de autocares totales que atraviesan la glorieta. No se han tenido en cuenta los autobuses públicos ya que cuentan con un trato diferente dentro del programa AIMSUN y se comentarán con más detalle en el apartado de introducción al transporte público.

DE:	A:	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	
1	3	15	19	25	21	21	21	19	20	23	22	24	15	9	14	17	241
1	6	1	1	0	0	1	2	0	0	1	1	0	0	0	0	0	43
1	7	3	7	4	0	1	0	2	2	4	9	5	4	1	1	0	43
1	10	10	12	13	11	16	20	19	17	20	23	21	15	15	15	14	241
2	3	3	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	8
2	6	1	2	1	0	0	0	0	1	1	1	2	0	0	0	0	9
2	7	10	6	1	0	0	0	0	2	1	3	2	1	0	0	0	26
2	10	4	7	3	7	6	8	8	4	4	4	2	4	4	3	3	71
4	6	5	11	6	4	8	6	4	5	4	4	3	4	3	2	2	71
4	7	8	19	12	16	10	18	10	11	10	15	12	13	9	8	11	182
4	8	1	3	0	0	0	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	7
4	10	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
5	3	2	5	3	2	3	0	2	1	1	0	1	0	0	0	0	20
5	7	0	1	2	3	2	0	1	1	0	1	0	4	0	0	0	15
5	8	5	1	0	0	0	4	0	1	1	4	4	0	0	0	0	20
5	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	2	1	0	0	7
9	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
9	7	6	9	10	9	9	10	8	7	12	14	17	15	9	9	7	151
9	8	0	5	4	2	3	2	3	3	3	2	7	2	2	2	3	43
		77	113	85	75	80	92	76	75	85	104	103	81	53	54	57	1202

Tabla 6.4.6: Intensidades horarias de los autocares.

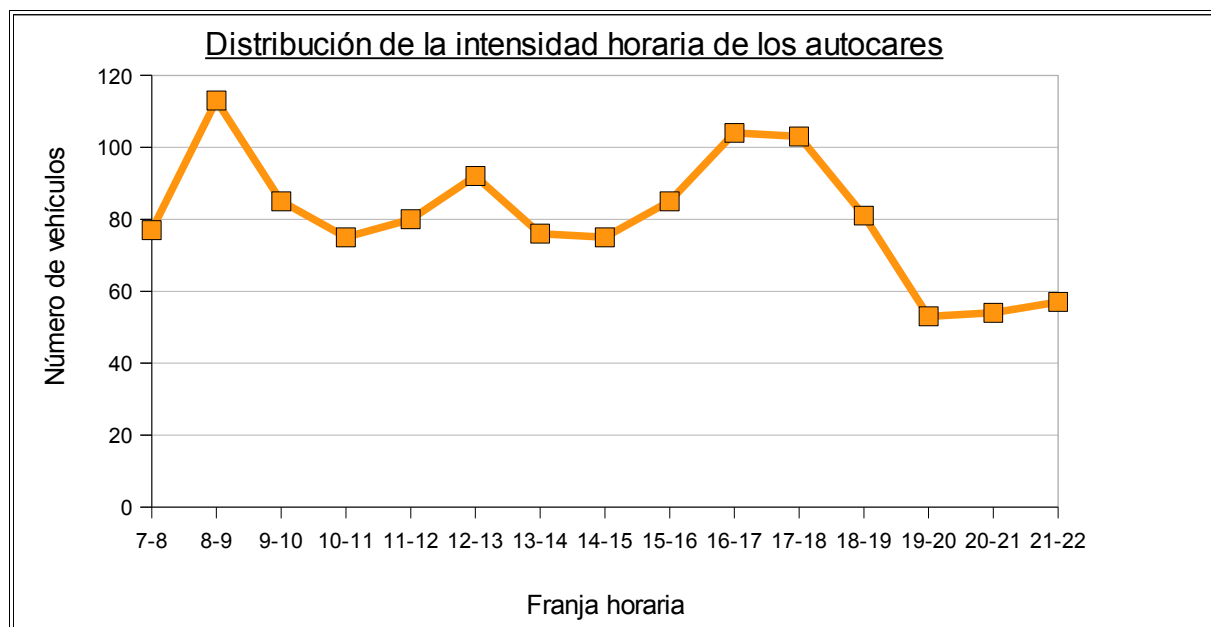


Figura 6.4.5: Intensidad horaria de los autocares.

### ***Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.***

El desplazamiento y uso de este tipo de vehículos está muy ligado con el desplazamiento de niños de su casa al colegio y viceversa. Por eso se puede ver que los máximos se localizan en los intervalos entre las 8 y las 9 de la mañana y por la tarde entre las 4 y las 6. Desgraciadamente estos periodos coinciden con los máximos del total de vehículos, no ayudando a la circulación.

### Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.

Y por último, para las motos, representando en la figura 6.4.8 los datos de la tabla 6.4.7, se obtiene lo siguiente:

DE:	A:	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	
1	3	15	36	40	15	16	16	12	11	15	21	22	12	14	18	21	384
1	6	3	6	2	7	3	8	5	5	12	7	2	1	2	0	0	63
1	7	2	8	7	9	8	12	12	23	19	26	22	19	21	18	25	231
1	10	20	51	37	22	21	20	18	20	19	20	21	29	36	26	24	384
2	3	5	7	6	4	2	3	1	6	2	2	3	11	8	7	4	71
2	6	2	10	3	5	5	9	7	4	6	3	1	0	1	2	0	58
2	7	8	9	2	1	2	0	1	3	2	5	6	3	1	1	2	46
2	10	8	12	7	5	8	5	5	9	4	2	4	1	0	2	0	72
4	6	0	4	5	3	3	0	2	4	0	0	2	0	1	2	1	27
4	7	6	18	15	21	25	27	24	20	31	27	21	23	21	28	24	331
4	8	1	2	3	1	2	4	2	0	0	2	0	2	2	0	0	21
4	10	3	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	3	0	0	10
5	3	0	2	4	1	1	2	0	3	1	2	0	1	0	0	0	17
5	7	0	3	2	3	2	5	2	3	7	4	6	3	5	4	5	54
5	8	0	7	6	6	5	5	3	10	3	12	5	8	11	13	7	101
5	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1
9	3	1	1	2	2	1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	10
9	6	1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	2	0	3	1	0	11
9	7	7	15	22	13	11	11	19	33	40	31	32	35	51	50	27	397
9	8	2	3	4	1	3	4	10	15	5	12	13	4	8	6	5	95
		84	194	169	121	119	131	124	169	167	179	162	153	189	178	145	2384

Tabla 6.4.7: Intensidades horarias de las motos.

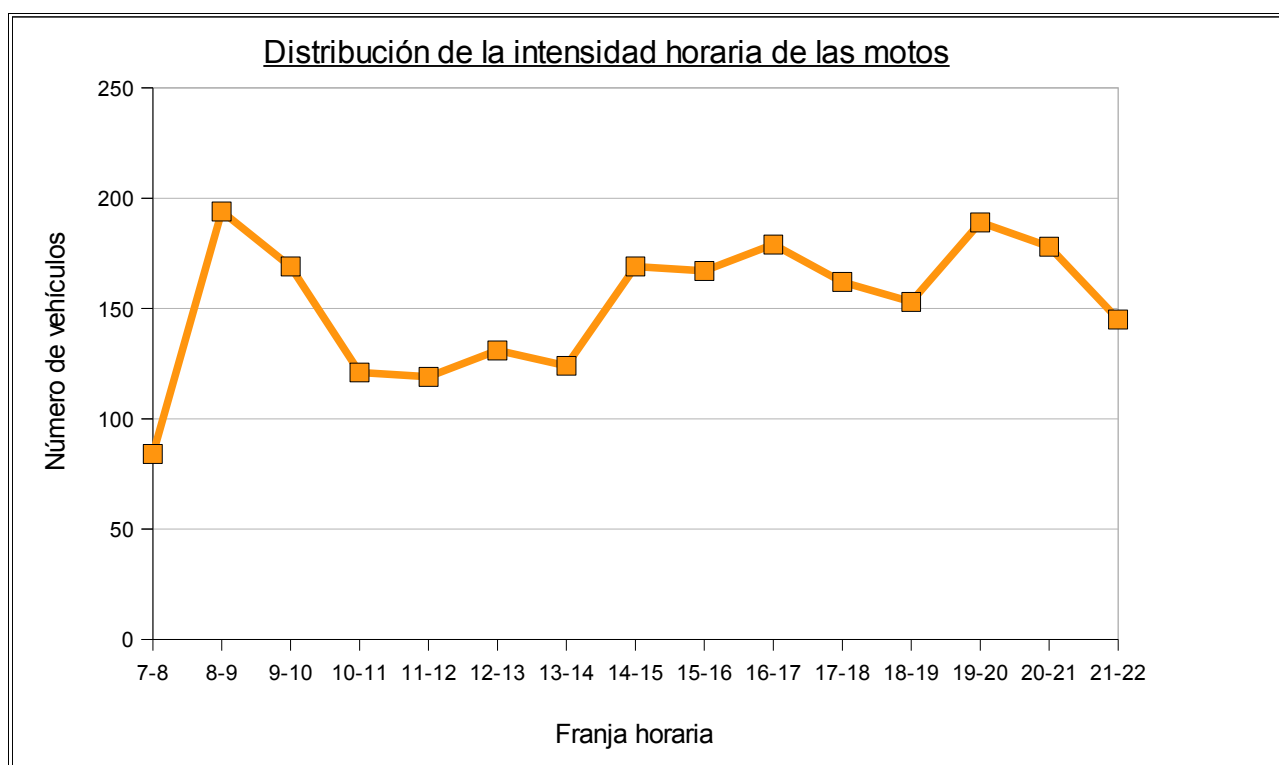
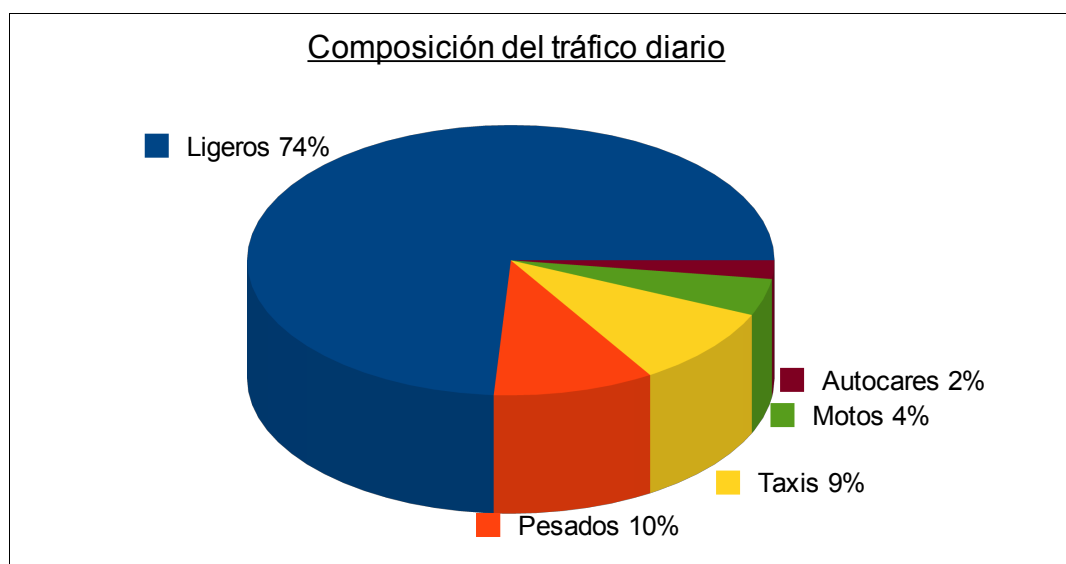


Figura 6.4.6: Intensidad horaria de las motos.



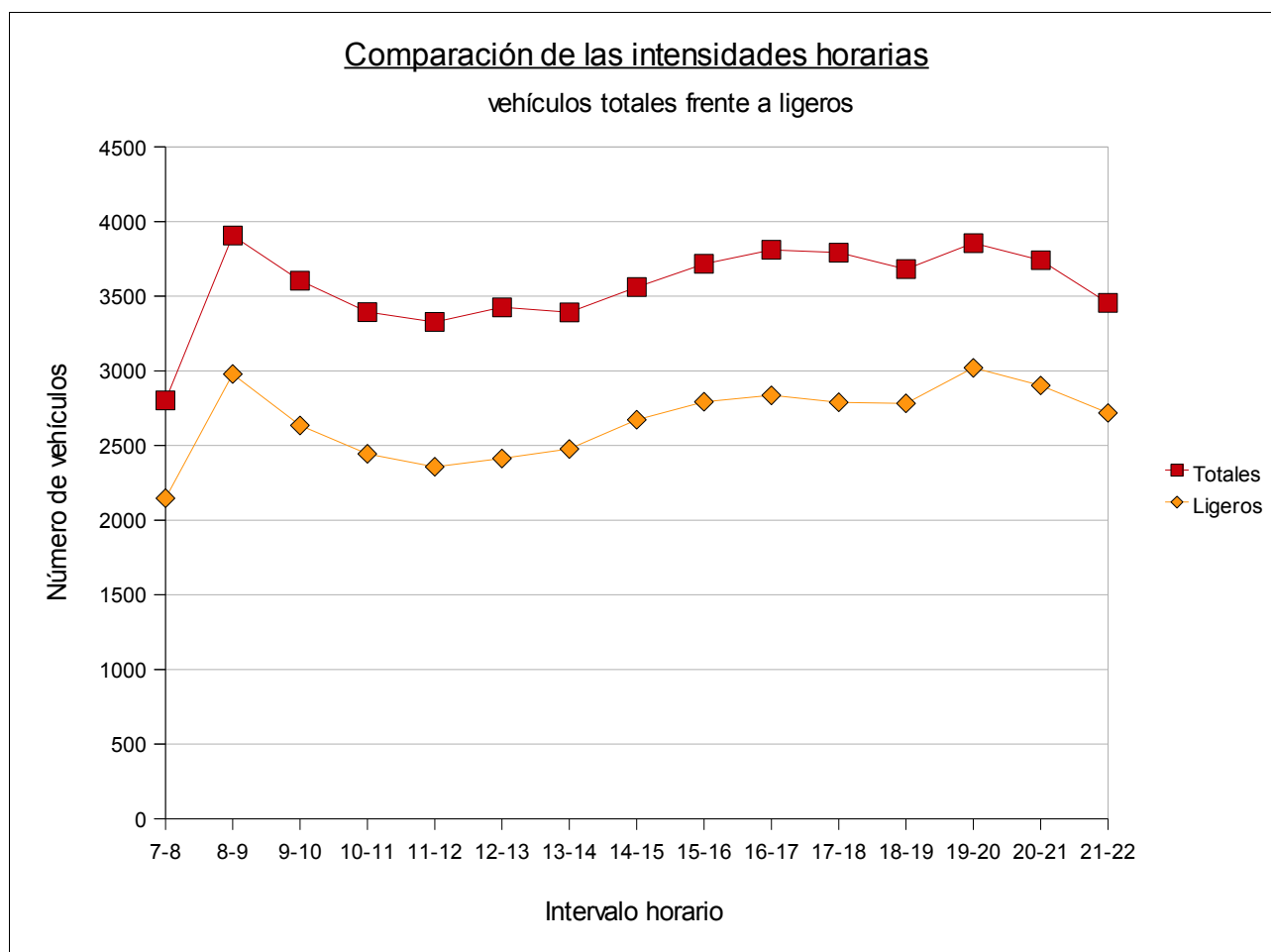
Se podría decir que esta distribución es similar a la del total de vehículos pero con unas diferencias entre los periodos de máximo y mínimo número de vehículos mucho más acusada. Aún así, dado que su número es muy pequeño, menos de 200 en su máximo valor, y que resultan ser vehículos pequeños y ágiles, apenas afectan negativamente al tráfico.

En las gráficas anteriores se ha visto que para la mayoría de los tipos de vehículos las distribuciones horarias no son constantes, todo lo contrario que ocurre con lo vehículos ligeros y su suma total. Esto hace pensar que la influencia de los vehículos pesados, taxis, motos y autocares es mucho menor que la de vehículos ligeros. En la figura 6.4.6 se muestra un gráfico con la proporción de los distintos tipos de vehículos.



*Figura 6.4.7: Composición del tráfico en la glorieta de las Pirámides.*

La proporción de vehículos ligeros es mucho mayor a la del resto de vehículos, razón por la cual la distribución total de vehículos ligeros y totales es tan similar. Se puede contrastar esta evidencia si se compara las gráficas de los vehículos totales y ligeros, figura 6.4.7.



*Figura 6.4.8: Comparación de las intensidades horarias. Vehículos ligeros y totales.*

En el próximo apartado se hablará del modelado de los pasos de peatones y por ello también es necesario exponer en este capítulo sus aforos. El Excelentísimo Ayuntamiento de Madrid cuenta con datos sobre el número de peatones que cruzan cada paso de cebra de la Glorieta de las Pirámides. Para el presente estudio solo se tuvieron en cuenta los cuatro pasos de peatones que tienen influencia con en el tráfico motorizado. Los datos de estos cuatro cruces se presentan en la siguiente tabla:

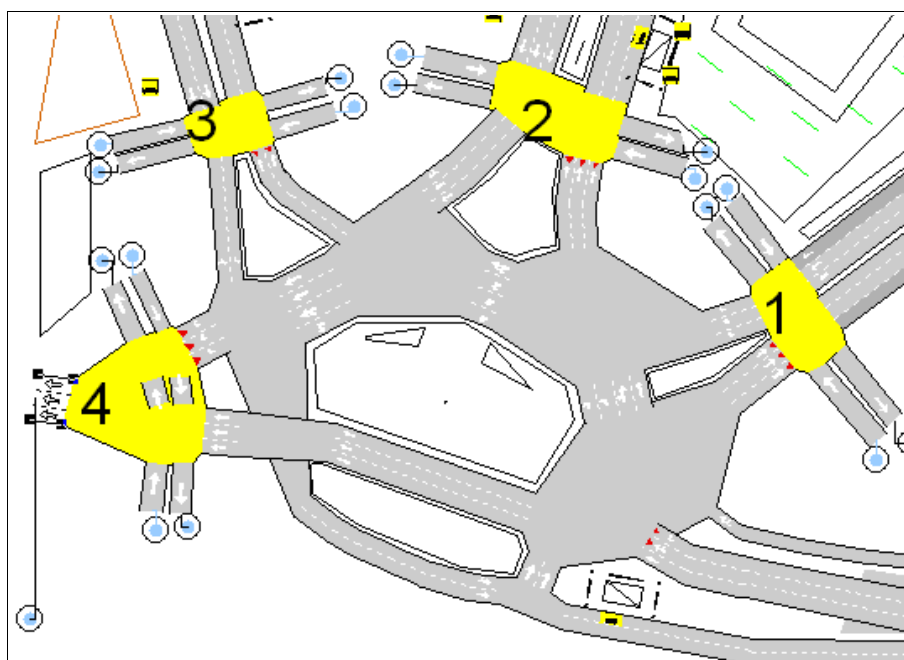
Localización cruce	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	TOTAL
Paseo de las Acacias	155	361	245	211	240	224	236	204	208	253	290	385	427	232	183	3854
Calle de Toledo	324	589	547	363	347	350	494	548	361	470	641	412	491	332	224	6493
Paseo Imperial	199	494	368	204	321	242	280	418	288	815	548	534	447	296	359	5813
Alejandro Dumas	109	205	112	110	129	234	190	175	144	336	212	398	214	326	274	3168

*Tabla 6.4.8: Aforos de peatones.*

## 6.5. INTRODUCCIÓN A LOS PASOS DE PEATONES.

La glorieta de las Pirámides consta de cuatro pasos de peatones (figura 6.5.1) que influyen sobre la circulación de los vehículos motorizados. La razón es que se trata de cruces regulados por semáforos con luz naranja intermitente, que dan preferencia a los peatones pero que permiten el paso de vehículos. Estos pasos son:

- Paseo de las Acacias (1).
- Calle de Toledo (2).
- Paseo Imperial (3).
- Salida de la glorieta de las Pirámides por Alejandro Dumas (4).

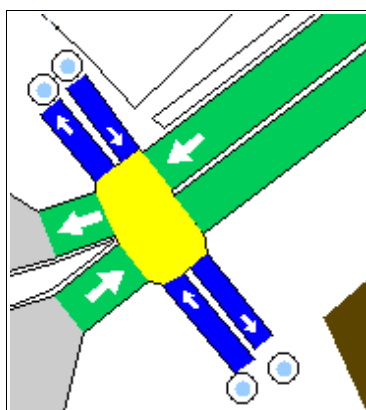


*Figura 6.5.1: Numeración y localización de los pasos de peatones.*

La versión 4.1 de GETRAM no dispone de una herramienta específica para los pasos de peatones, por lo que se han tenido que modelar estos pasos con utilidades inicialmente pensadas para otros fines.

### 6.5.1. Modelado del cruce.

Para el modelado, se ha considerado a los peatones como otra clase de vehículos que circulan por vías diferentes del resto. Para que esto haya sido posible, se han creado en las intersecciones de estudio dos carriles de entrada y dos carriles de salida. Estos 4 carriles son exclusivos para los peatones y perpendiculares a los carriles destinados para el tráfico de vehículos a motor. En la figura 6.5.2 puede verse en detalle uno de estos cruces. En verde aparecen los carriles destinados a los vehículos, en azul para peatones y en amarillo el cruce.

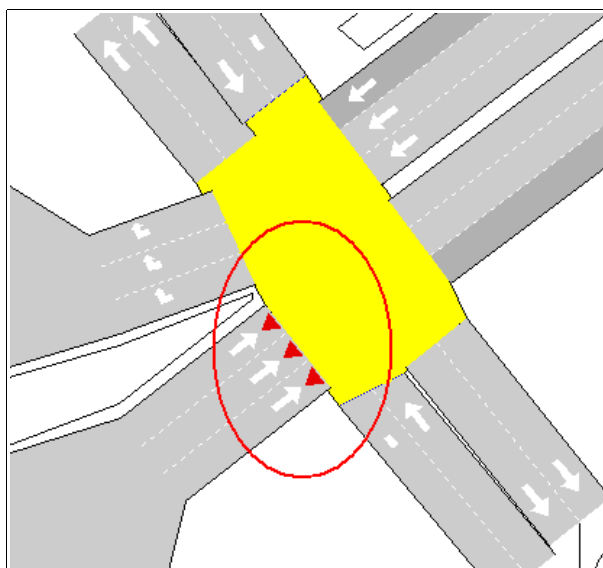


*Figura 6.5.2: Detalle de los carriles en los pasos de peatones.*

Como se puede ver en la figura anterior cada carril para peatones tiene asociado un centroide, que en la figura aparecen como 2 círculos concéntricos. Esto es lo que hace que los carriles azules sean exclusivos para los peatones y que a la vez no puedan salir hacia los carriles para vehículos. A través de la matriz Origen/Destino estos centroides se configuran como fuentes y sumideros exclusivos para peatones, con lo cual es imposible que algún vehículo pueda meterse en el carril. Del mismo modo, el destino de los peatones que se generan en uno de estos centroides “fuente”, es el centroide que se encuentra en el carril al otro lado del cruce, con lo que el único camino que pueden seguir los peatones es cruzar el cruce en línea recta hasta el otro carril.

Se podría haber abordado este problema reservando las aceras exclusivamente a los peatones, pero debido a la disposición de los centroides para el paso de peatones, es más sencilla la primera opción.

Otro aspecto que hay que modelar en el cruce son las señales luminosas de los semáforos. GETRAM no dispone de luces de ámbar intermitente para los vehículos, ni de verde intermitente para los peatones. Como solución a este problema se ha modelado la señal ámbar intermitente como paso permitido (luz verde) tanto para los vehículos como para peatones, pero añadiendo un ceda el paso al carril de los vehículos, como se muestra en la figura 6.5.3. De esta forma, el comportamiento de la intersección es exactamente igual a la realidad.

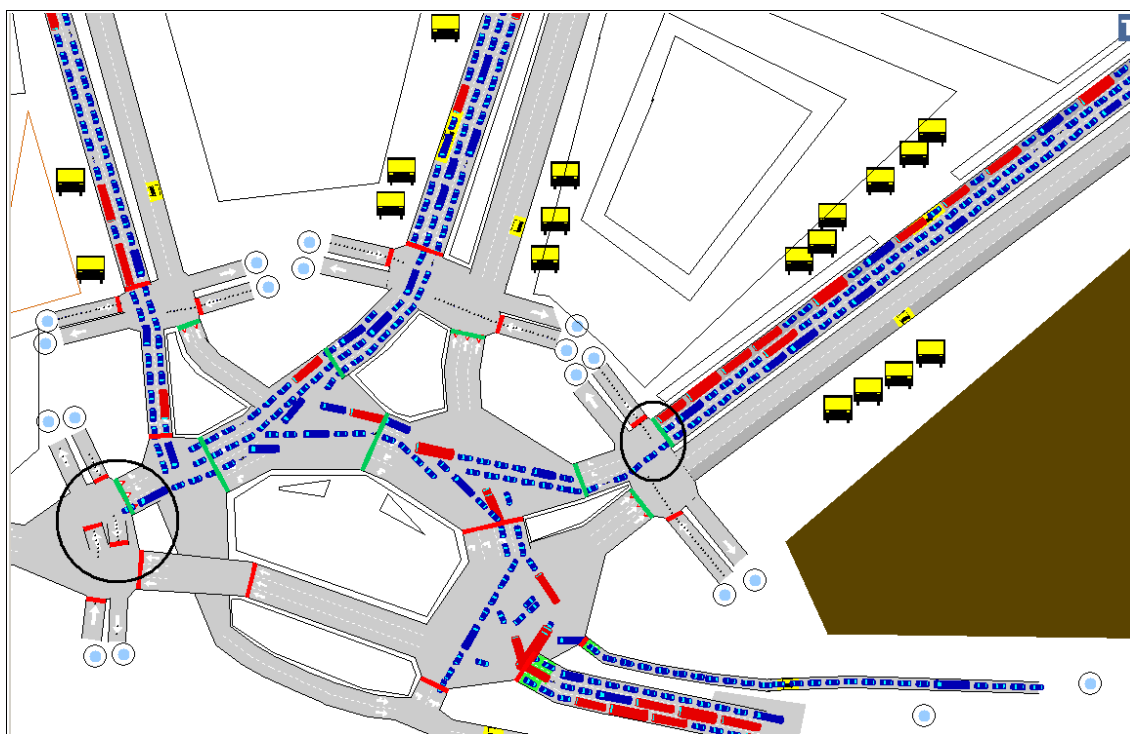


*Figura 6.5.3: Detalle del ceda el paso en un paso de peatones.*

Para el caso de verde intermitente se han considerado ciertos aspectos de GETRAM referentes a las intersecciones. Una vez que un vehículo pasa por su entrada a la intersección su comportamiento es independiente del estado del semáforo que regula su entrada. Esto quiere decir que si un peatón entra a la intersección y, debido a su escasa velocidad, el semáforo se pone en rojo, el peatón seguirá cruzando a la misma velocidad obstaculizando el paso para los vehículos que tendrían la entrada permitida al cruce.

También se deben considerar aspectos de la realidad. Los peatones observan el semáforo que regula su paso en la acera de enfrente a la que están para comenzar a cruzar. Esto quiere decir, que son conscientes de cuándo su paso no está permitido una vez que están dentro del cruce. Esto suele provocar que aceleren su paso o regresen a la acera de partida para no interrumpir el paso de vehículos.

Aunando estos dos aspectos de la realidad y del programa, se ha decidido que los ciclos de verde intermitente se consideren como de paso no permitido, ya que sólo afectarán a los peatones que van a iniciar la entrada a la intersección y no a los que ya están en ella. De otra forma, si se les permitiera el paso debido a su velocidad bloquearían el paso de los vehículos saturando la red, como se pudo comprobar en la figura 6.5.4.



*Figura 6.5.4: Colapso de la red debido a un mal modelado de los pasos de peatones.*

Otro aspecto importante que se ha tenido que analizar es el número de carriles para permitir el paso de los peatones. En la realidad, no existen carriles definidos para el trayecto de los peatones, si no un espacio sobre el cual los peatones pueden circular libremente creando tantos carriles paralelos como sus dimensiones les permitan. Aunque aparentemente las intersecciones en GETRAM parezcan cumplir esta condición, no es así. Cada intersección tiene una serie de carriles virtuales por los que circulan los vehículos, aunque visualmente no aparezcan. Por ejemplo, si a una intersección llega una sección con tres carriles y la salida es por una sección más estrecha de sólo dos carriles, en el interior de la intersección se pasará de tres a dos carriles. Lo que nunca ocurrirá es que existan más de tres carriles, ni menos de dos.

Para el caso de los pasos de peatones, al cruzar la intersección, los peatones van en fila. Si a este efecto se le suma el hecho de que la velocidad de los peatones se encuentra entre los 3 y los 5 km/h, el resultado es una intensidad muy pequeña que provoca atascos y colas. La solución es aumentar el número de carriles. Con uno adicional se dobla la intensidad, con dos se triplica, etc. Sin embargo, dadas las características del movimiento de los peatones, que van de extremo a extremo de la intersección sin posibilidad de ir por otro camino, aumentar el número de carriles es lo mismo que disminuir el número de peatones que cruzan en la matriz O/D. Se eligió ésta segunda opción por simplicidad.

Para el cálculo de cuánto se debería disminuir el número de transeúntes que debería haber se realizaron pruebas, siendo los resultados los que aparecen en la tabla 6.5.1.

Localización	Nº de carriles
Paseo de las Acacias	2
Calle de Toledo	3
Paseo Imperial	3
Alejandro Dumas	2

*Tabla 6.5.1: Número de carriles asignados a cada paso de peatones.*

Las pruebas consistían en evitar que los pasos se colapsasen a las horas puntas, utilizando para ello los aforos de peatones proporcionados por el Excelentísimo Ayuntamiento de Madrid y que ya se presentaron en el apartado de aforos en la tabla 6.4.10. Como se puede ver en dicha tabla, son precisamente los pasos de peatones de la calle de Toledo y del paseo Imperial los que cuentan con mayor número de peatones a lo largo del día, siendo las horas de mayor afluencia el intervalo de 5 a 8 de la tarde.

## **6.5.2. Modelado de peatones.**

Esta versión de GETRAM tampoco dispone de perfiles para el tipo de vehículo peatón, pero sí dispone de herramientas para su creación. En el capítulo “Definición de los Parámetros Básicos”, se podrá ver la ficha con los atributos mínimos necesarios para la creación de un nuevo tipo de vehículo, así como los elegidos para los peatones. Se han seleccionado esos parámetros considerando las características típicas de los peatones, ayudándose además de datos obtenidos de versiones más recientes y de estudios previos. [3]

## **6.6. LOS AUTOBUSES DE LA EMT.**

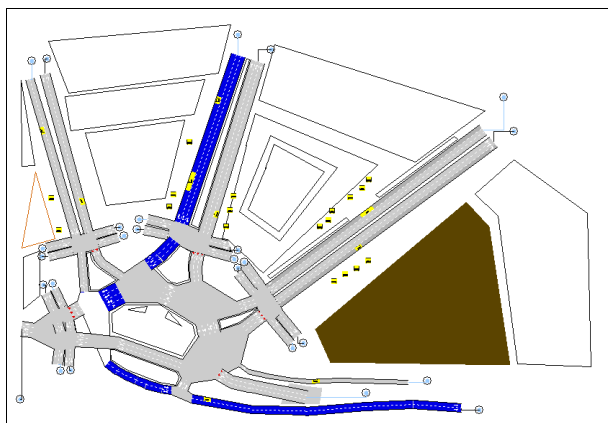
A diferencia de los autocares privados, los autobuses públicos de la EMT se introducen de manera diferente y no se introducen a través de la matriz O/D. Esto se debe a que estos vehículos cuentan con características especiales:

- Utilizan una ruta preestablecida.
- Sus horarios son de intervalos fijos y en relación con el resto de vehículos su número es despreciable.
- Realizan paradas obstaculizando, en algunos casos, carriles de circulación.
- A pesar de ser pocos en cantidad, son vehículos grandes y pesados, lo que les hacen ser más torpes que los vehículos ligeros.
- En algunas vías tienen carriles reservados para minimizar su impacto en el tráfico.

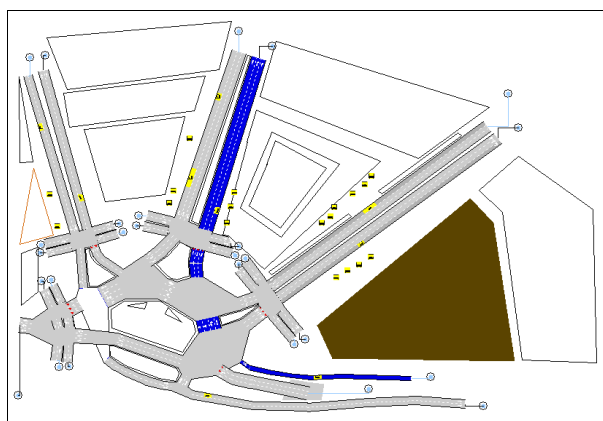
### **6.6.1. Itinerarios.**

Por la glorieta de las Pirámides pasan nueve líneas de autobús diurnas que se recogen en el Anexo I con su itinerario completo. El paso siguiente es definir cada línea, tanto en un sentido como en otro, y sus horarios. Para determinar el itinerario, se seleccionan las secciones por las que va transcurriendo cada línea. Esto se puede ver con más detalle en las imágenes siguientes:

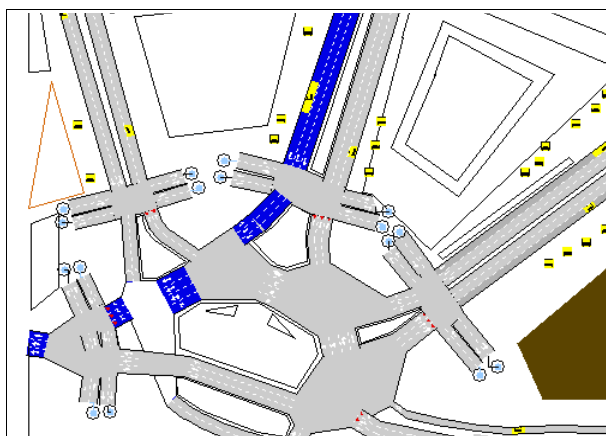




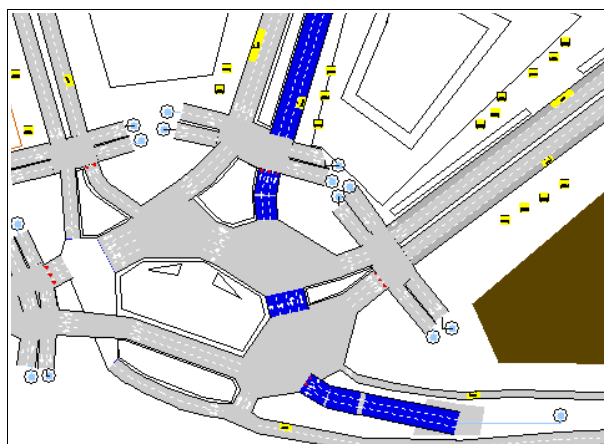
*Figura 6.6.1: Itinerario línea 18 ida.*



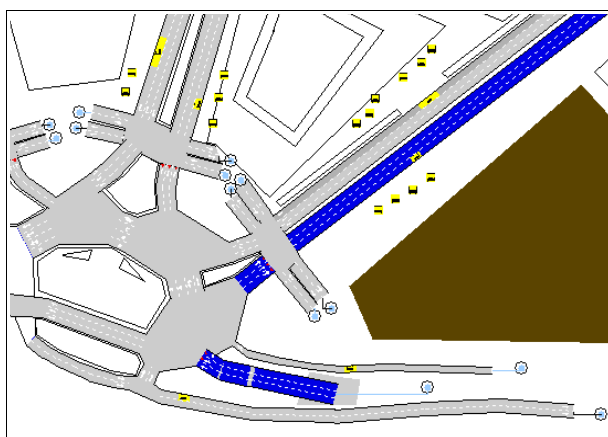
*Figura 6.6.2: Itinerario línea 18 vuelta.*



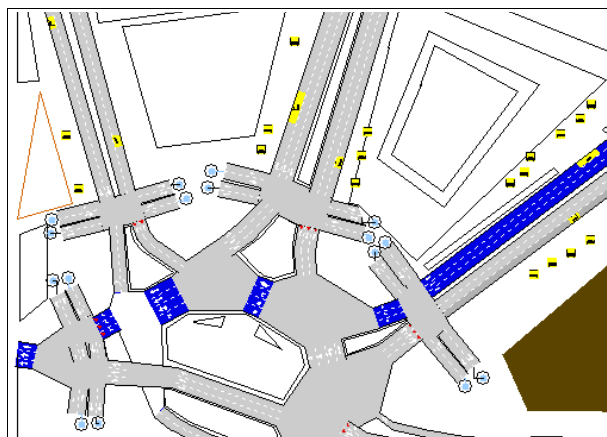
*Figura 6.6.3: Itinerario líneas 23 y 35 ida.*



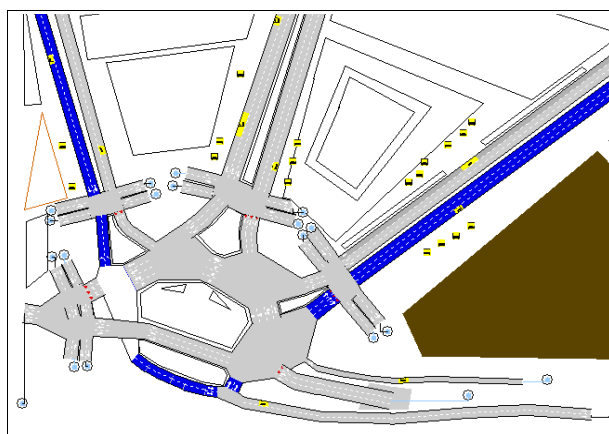
*Figura 6.6.4: Itinerario líneas 23 y 35 vuelta.*



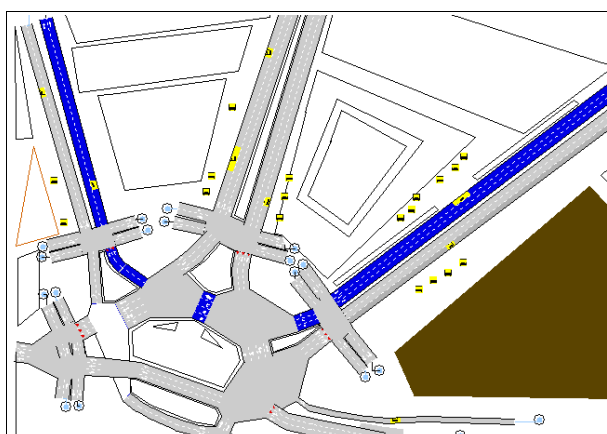
*Figura 6.6.5: Itinerario líneas 34, 116, 118 y 119 ida.*



*Figura 6.6.6: Itinerario líneas 34, 116, 118 y 119 vuelta.*



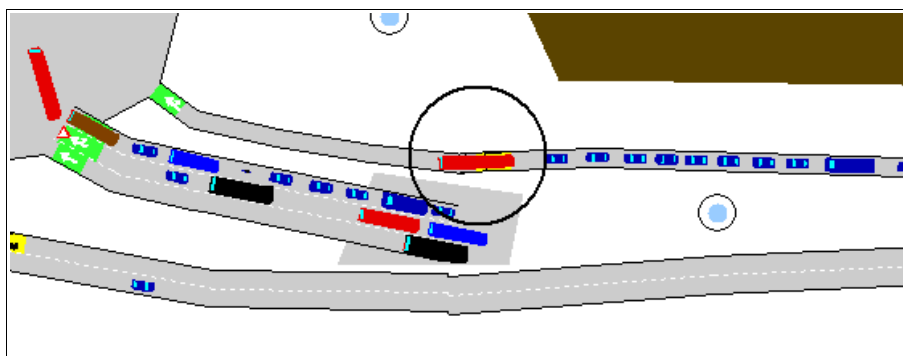
*Figura 6.6.7: Itinerario líneas 36 y 62 ida.*



*Figura 6.6.8: Itinerario líneas 36 y 62 vuelta.*

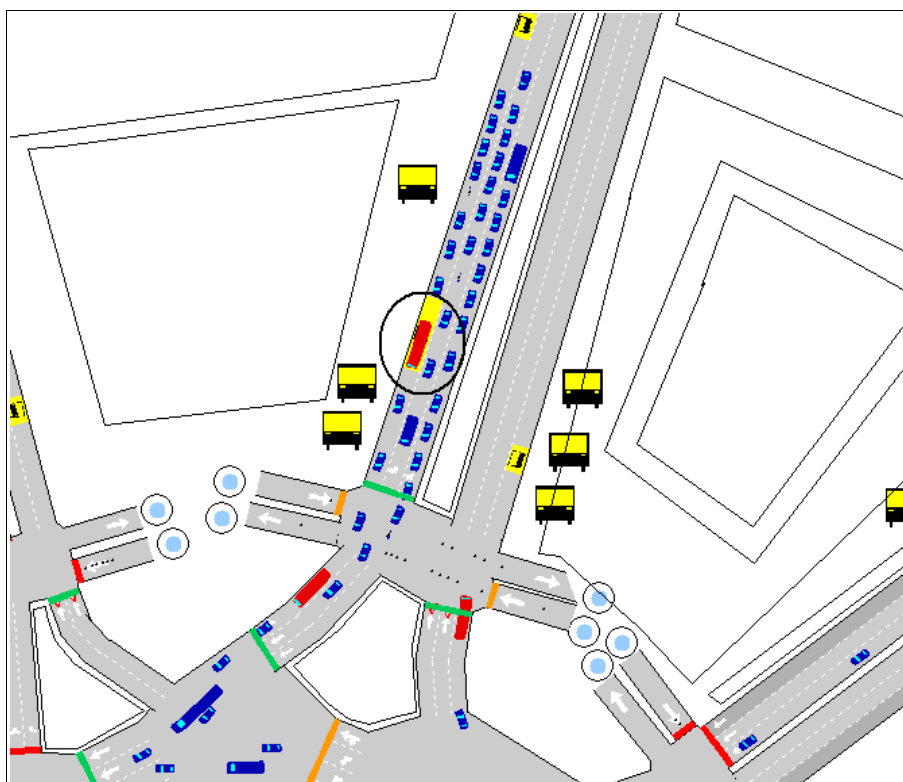
## 6.6.2. Líneas problemáticas.

La línea 18, en su sentido hacia la puerta de Toledo, es la que más impacto tiene sobre la red debido a que su parada en el paseo de las Yaserías, figura 6.6.9, obstaculiza completamente el tráfico durante el tiempo que tardan en subir y bajar los peatones.



*Figura 6.6.9: Autobús de la línea 18 obstaculizando el tráfico.*

Las líneas 18, 23 y 35 en su sentido desde la calle de Toledo, hacia la glorieta de las Pirámides, también generan problemas en la red. Esta vía de entrada tiene mucho tráfico y a pesar de tener tres carriles son tres líneas de autobús las que circulan impidiendo la circulación por el carril derecho durante sus paradas. En la figura 6.6.10. se muestra cómo un autobús obstaculiza este tramo.



*Figura 6.6.10: Autobús de las líneas 18, 23 y 35 obstruyendo el tráfico.*

El resto de líneas no representan demasiado problema para la red en su itinerario, debido a que sus paradas se encuentran en carriles reservados para autobuses y taxis, como en el caso del paseo de las Acacias, o en vías con muy poco tráfico.

### **6.6.3. Horarios.**

En la página web de la EMT (Empresas Municipal de Transportes) se pueden obtener los horarios de todas las líneas, y concretamente de las que circulan por la red de estudio. Para un mayor parecido con la realidad, este servicio virtual es capaz de localizar la posición exacta de cualquier autobús y calcular el tiempo aproximado que le queda para llegar a la siguiente parada. También se puede encontrar en dicha página web tiempos de espera entre autobuses consecutivos. Con estos datos se puede realizar una tabla con los intervalos de tiempo de cada línea: mínimo, máximo y real (tabla 6.6.1).

Lineas	Mínimo (min)	Máximo (min)	Real (min)
18	8	13	11
23	7	7	7
34	6	11	8
35	7	15	12
36	10	15	<b>19</b>
62	8	11	9
116	13	18	13
118	9	15	9
119	13	16	<b>16</b>

*Tabla 6.6.1: Intervalos de llegada para los autobuses de la EMT.*

Con estos datos se conforman los intervalos de cada línea, que el programa GETRAM permite introducir como una función normal con media y desviación típica. Así, por ejemplo, para la línea 18 se eligió un valor medio de 10,5 minutos y 2,5 minutos de desviación típica. Los valores de tiempo real, solo se utilizaron para las líneas que tenían mayor retardo frente al programado, como la línea 36, a la hora de calcular la desviación típica.

El último paso consiste en incluir las líneas de autobús creadas en un plan general de transporte (*pt plan*). Una vez que se tienen todas las líneas con los itinerarios, horarios y tiempos de subida y de bajada, el último trámite consiste en indicar cuántas líneas van a circular por la red durante la simulación.

## 6.7. DEFINICIÓN DE LOS PARÁMETROS BÁSICOS.

Además de los datos referentes a la geometría, el plan de control y el plan de transporte, existen otros parámetros influyentes, que se comentarán a lo largo de este apartado. Algunos de ellos se introducen en el editor TEDI, como viene siendo normal hasta ahora, y otros en el simulador AIMSUN.

### 6.7.1. Parámetros de la red.

En el editor TEDI se puede variar una gran cantidad de parámetros de la red. Estos pueden afectar a toda la red, a alguna sección, o a las intersecciones[2,6].

– Parámetros que afectan a toda la red:

- *Width*: indica el ancho de la sección, pudiendo establecerse un ancho común para todas las secciones. Según las características de la red que se quiera modelar, el programa trae una serie de vías predeterminadas ( free way, road, street, arterial). A su vez, dentro de cada tipo de sección se pueden variar algunos otros parámetros, como la capacidad o la velocidad máxima.
- *Distance zone 1*: es la distancia, expresada en segundos, hasta la próxima intersección en la que un vehículo considera que debe cambiar de carril. Será mayor o menor en función del tipo de vehículo, ya que cada uno de éstos tiene asignada una velocidad deseada de circulación.
- *Distance zone 2*: es la distancia, expresada en segundos, hasta la próxima intersección en la cual el conductor empieza a forzar el cambio de carril, deteniéndose si fuera necesario.
- *Distance on ramp*: parámetro utilizado durante las incorporaciones.
- *Distinguish destination lanes in turning*: con esta opción se puede limitar el número de carriles de la sección de destino permitido para los vehículos que están entrando en una intersección. Por defecto esta opción no está activa.

– Parámetros que afectan a las secciones: se puede modificar en cada sección los mismos parámetros que para toda la red, excepto *Distinguish destination lanes in turning*. Además:

- Se pueden reservar carriles para alguna clase de vehículo, por ejemplo, el carril bus. Con esta opción se define qué clases de vehículos pueden circular por este carril, siendo imposible circular por él para el resto de vehículos. Esta opción permite, además, obligar a los vehículos que lo tienen reservado a circular por él o sólo utilizarlo si éste le hace avanzar más deprisa.

- *Yellow box speed*: da una idea de la velocidad del vehículo precedente, por debajo de la cual frena, para evitar quedarse parado en la intersección que tenga esta opción marcada.
- *Visibility distance*: es la distancia de visibilidad de los conductores ante una intersección.
- *Maximum speed*: define la velocidad límite de cada sección. Este valor, legalmente corresponde a 50 km/h en todas las vías urbanas de la red. No obstante los vehículos, durante la simulación, pueden rebasarla.

- Parámetros que afectan a las intersecciones:

- Máxima velocidad de giro: se puede introducir la velocidad que se considere oportuna o dejar al editor TEDI que calcule su valor. La segunda opción es la que se toma por defecto.
- La intersección se define como amarilla (*yellow box*): una intersección con esta opción será aquella que no puede ser bloqueada, o lo que es lo mismo, no puede haber vehículos parados en su interior.
- Puede asignarse prioridad a unos movimientos frente a otros dentro de cada intersección, utilizando las señales de ceda el paso (*yield*) o stop.

## 6.7.2. Parámetros de cada tipo de vehículo.

El editor TEDI dispone de una biblioteca en la que aparecen los tipos de vehículos más comunes. Algunos de éstos son: vehículos ligeros, motocicletas, taxis y autocares. Sin embargo, no dispone de vehículos para modelar a los peatones, ni para ciertos ajustes en los vehículos pesados. Este editor, tampoco dispone por defecto de los parámetros de consumo de combustible ni de contaminantes.

Para definir un nuevo tipo de vehículo, los parámetros mínimos que GETRAM o TEDI nos permiten configurar son:

- *Length*: Longitud del vehículo (m).
- *Width*: Anchura del vehículo (m).
- *Maximun desire speed*: Velocidad máxima que puede alcanzar el vehículo en cualquier punto de la red, sujeto a la velocidad límite de la sección (km/h).
- *Maximun acceleration*: Aceleración máxima del vehículo ( $\text{m/s}^2$ ).
- *Normal deceleration*: Deceleración máxima en condiciones normales ( $\text{m/s}^2$ ).
- *Maximun deceleration*: Deceleración máxima en frenadas de emergencia, por ejemplo para evitar saltarse un semáforo en rojo ( $\text{m/s}^2$ ).
- *Speed acceptance*: Grado de cumplimiento de los límites de velocidad. Este parámetro es adimensional e indica el tanto por uno de los vehículos que cumplen con el límite.
- *Minimun distance betwen vehicles*: Distancia mínima entre vehículos parados (m).
- *Give way time*: Tiempo de espera a partir del cual el vehículo se comporta de manera más agresiva. Este parámetro es determinante en los cedas el paso o en los cambios de carril (en segundos).
- *Gidance / Acceptance*: Indica la probabilidad en tanto por uno de seguir una recomendación de un cartel indicativo. En este caso, este parámetro no tiene influencia.

Cada uno de estos parámetros puede no ser fijo sino pertenecer a una distribución normal con media y desviación típica definible, así como sus valores máximos y mínimos permitidos.

Los parámetros que por defecto TEDI tiene para los vehículos ligeros, los autocares, las motos y los taxis, son los que aparecen en las figuras 6.7.1 a 6.7.4.



**Vehicle Types (MODEL)**

Vehicle Types: bus, **car1**, motorbike, Peaton

Attributes: Name: car1

Parameter	Classes	Fuel	Pollutants
Name	Mean	Devia.	Min. Max. Units
Length	3.60	0.00	3.60 3.60 meter
Width	1.60	0.00	1.60 1.60 meter
Max Desired Speed	90.00	0.00	90.00 90.00 Km/h
Max Acceleration	2.50	0.00	2.50 2.50 m/s <sup>2</sup>
Normal deceleration	3.50	0.00	3.50 3.50 m/s <sup>2</sup>
Max deceleration	7.00	0.00	7.00 7.00 m/s <sup>2</sup>
Speed Acceptance	1.00	0.00	1.00 1.00
Min Distance Veh	1.00	0.00	1.00 1.00 meter
Give Way time	30.00	30.00	0.00 30.00 sec.
Guidance Acceptance	0.00	0.00	0.00 0.00

Guided vehicles: 0.00 Cruising Tolerance: 0.80 m/s<sup>2</sup>

*Figura 6.7.1: Parámetros de los vehículos ligeros.*

**Vehicle Types (MODEL)**

Vehicle Types: **bus**, car1, motorbike, Peaton

Attributes: Name: bus

Parameter	Classes	Fuel	Pollutants
Name	Mean	Devia.	Min. Max. Units
Length	7.50	2.00	7.50 12.00 meter
Width	2.20	0.00	2.20 2.20 meter
Max Desired Speed	60.00	0.00	60.00 60.00 Km/h
Max Acceleration	2.00	0.00	2.00 2.00 m/s <sup>2</sup>
Normal deceleration	6.00	0.00	6.00 6.00 m/s <sup>2</sup>
Max deceleration	6.00	0.00	6.00 6.00 m/s <sup>2</sup>
Speed Acceptance	1.00	0.00	1.00 1.00
Min Distance Veh	1.00	0.00	1.00 1.00 meter
Give Way time	90.00	0.00	90.00 90.00 sec.
Guidance Acceptance	0.00	0.00	0.00 0.00

Guided vehicles: 0.00 Cruising Tolerance: 0.80 m/s<sup>2</sup>

*Figura 6.7.2: Parámetros de los autocares.*

**Vehicle Types (MODEL)**

**Vehicle Types**

- bus
- car1
- motorbike**
- Peaton

**Attributes**

Name: motorbike

Parameter	Classes	Fuel	Pollutants		
<b>Name</b>	<b>Mean</b>	<b>Devia.</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>	<b>Units</b>
Length	2.00	0.00	2.00	2.00	meter
Width	0.70	0.00	0.70	0.70	meter
Max Desired Speed	50.00	0.00	50.00	50.00	Km/h
Max Acceleration	1.50	0.00	1.50	1.50	m/s2
Normal deceleration	2.50	0.00	2.50	2.50	m/s2
Max deceleration	5.00	0.00	5.00	5.00	m/s2
Speed Acceptance	1.00	0.00	1.00	1.00	
Min Distance Veh	1.00	0.00	1.00	1.00	meter
<b>Give Way time</b>	<b>30.00</b>	<b>30.00</b>	<b>0.00</b>	<b>30.00</b>	<b>sec.</b>
Guidance Acceptance	0.00	0.00	0.00	0.00	

Guided vehicles: 0.00 Cruising Tolerance: 0.80 m/s2

*Figura 6.7.3: Parámetros de las motos.*

**Vehicle Types (MODEL)**

**Vehicle Types**

- motorbike
- Peaton
- taxi**
- truck

**Attributes**

Name: taxi

Parameter	Classes	Fuel	Pollutants		
<b>Name</b>	<b>Mean</b>	<b>Devia.</b>	<b>Min.</b>	<b>Max.</b>	<b>Units</b>
Length	4.00	0.00	4.00	4.00	meter
Width	1.60	0.00	1.60	1.60	meter
Max Desired Speed	70.00	0.00	70.00	70.00	Km/h
Max Acceleration	2.50	0.00	2.50	2.50	m/s2
Normal deceleration	3.50	0.00	3.50	3.50	m/s2
Max deceleration	7.00	0.00	7.00	7.00	m/s2
Speed Acceptance	1.00	0.00	1.00	1.00	
Min Distance Veh	1.00	0.00	1.00	1.00	meter
Give Way time	20.00	20.00	0.00	30.00	sec.
Guidance Acceptance	0.00	0.00	0.00	0.00	

Guided vehicles: 0.00 Cruising Tolerance: 0.80 m/s2

*Figura 6.7.4: Parámetros de los taxis.*

De acuerdo a la Ordenanza de Movilidad para la Ciudad de Madrid [14] no está permitido el paso por la glorieta de las Pirámides, ni por las calles adyacentes a camiones de más de 12 toneladas, desde las 7 de la mañana hasta las 11 de la noche, de Lunes a Jueves. Por esta razón se ha limitado la longitud máxima de los vehículos pesados a 8 metros de longitud y 2,5 metros de ancho, por ser éstas las dimensiones características de los camiones comerciales de este tonelaje. Se han tenido que revisar, por tanto, los parámetros de vehículos pesados que proponía el editor TEDI, siendo los parámetros utilizados los que aparecen en la figura 6.7.5.

**Vehicle Types (MODEL)**

**Vehicle Types**

- motorbike
- Peaton
- taxi
- truck**

**Attributes**

Name: truck

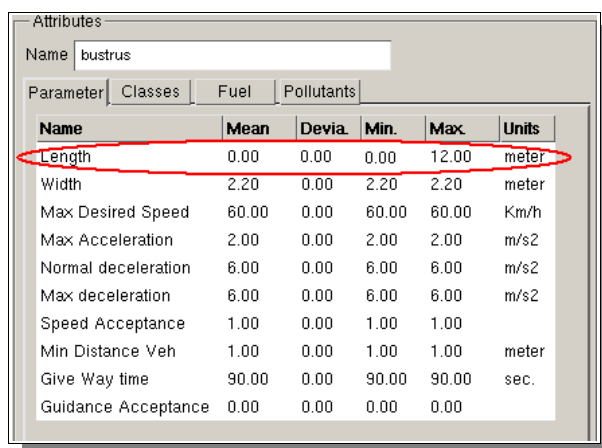
Parameter	Classes	Fuel	Pollutants		
Name	Mean	Devia	Min.	Max	Units
Length	6.50	2.00	5.50	8.00	meter
Width	2.30	0.20	1.90	3.00	meter
Max Desired Speed	90.00	10.00	0.01	100.00	Km/h
Max Acceleration	1.25	0.01	1.00	1.25	m/s2
Normal deceleration	3.50	0.01	3.50	3.50	m/s2
Max deceleration	7.00	0.01	7.00	7.00	m/s2
Speed Acceptance	1.00	0.00	1.00	1.00	
Min Distance Veh	1.50	0.01	1.50	1.50	meter
Give Way time	50.00	20.00	30.00	80.00	sec.
Guidance Acceptance	0.66	0.01	0.66	0.66	

Guided vehicles: 0.25    Cruising Tolerance: 0.80 m/s2

OK    Cancel

*Figura 6.7.5: Parámetros de los vehículos pesados.*

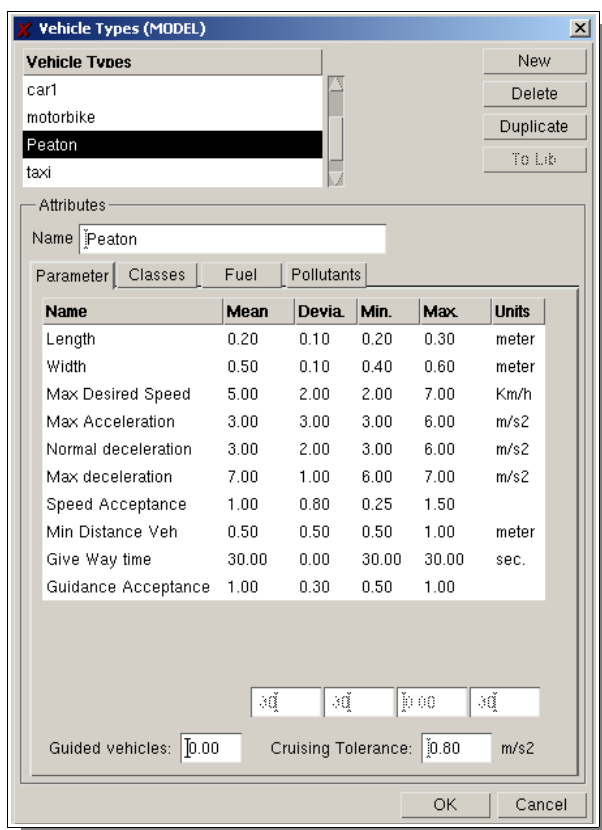
Para los autobuses de la EMT se utilizaron los mismos parámetros que para los autocares normales, a excepción de los autobuses pertenecientes a la línea 34. Estos autobuses son articulados y, por tanto, de mayores dimensiones, con lo que su parámetro de longitud está fijado en 12 metros. El resto de parámetros son iguales a los autobuses normales, como se puede ver en la figura 6.7.6.



Name	Mean	Devia.	Min.	Max.	Units
Length	0.00	0.00	0.00	12.00	meter
Width	2.20	0.00	2.20	2.20	meter
Max Desired Speed	60.00	0.00	60.00	60.00	Km/h
Max Acceleration	2.00	0.00	2.00	2.00	m/s <sup>2</sup>
Normal deceleration	6.00	0.00	6.00	6.00	m/s <sup>2</sup>
Max deceleration	6.00	0.00	6.00	6.00	m/s <sup>2</sup>
Speed Acceptance	1.00	0.00	1.00	1.00	
Min Distance Veh	1.00	0.00	1.00	1.00	meter
Give Way time	90.00	0.00	90.00	90.00	sec.
Guidance Acceptance	0.00	0.00	0.00	0.00	

*Figura 6.7.6: Parámetros del autobús de la línea 34.*

Como se comentó en el capítulo “Introducción a los Pasos de Peatones” TEDI no dispone de un perfil por defecto para esta clase de vehículos. Para modelarlos se eligieron los datos de la figura 6.7.7, por las razones que se exponían en el anterior capítulo.



Name	Mean	Devia.	Min.	Max.	Units
Length	0.20	0.10	0.20	0.30	meter
Width	0.50	0.10	0.40	0.60	meter
Max Desired Speed	5.00	2.00	2.00	7.00	Km/h
Max Acceleration	3.00	3.00	3.00	6.00	m/s <sup>2</sup>
Normal deceleration	3.00	2.00	3.00	6.00	m/s <sup>2</sup>
Max deceleration	7.00	1.00	6.00	7.00	m/s <sup>2</sup>
Speed Acceptance	1.00	0.80	0.25	1.50	
Min Distance Veh	0.50	0.50	0.50	1.00	meter
Give Way time	30.00	0.00	30.00	30.00	sec.
Guidance Acceptance	1.00	0.30	0.50	1.00	

Guided vehicles: 0.00      Cruising Tolerance: 0.80 m/s<sup>2</sup>

*Figura 6.7.7: Parámetros de los peatones.*

## **6.8. COMBUSTIBLE Y EMISIONES.**

GETRAM permite simular dos modelos de medio ambiente de manera separada, el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. Esto quiere decir que puede simularse el consumo de combustible únicamente, o el de emisiones, o ambos al mismo tiempo.

Los modelos de medio ambiente se seleccionan automáticamente cuando los datos correspondientes se definen en la biblioteca de tipos de vehículos. Si, por ejemplo, el usuario ha definido los datos de contaminación para cualquier tipo de vehículo, el modelo de emisión de contaminación se activará. El nombre del modelo seleccionado se mostrará en el área de información en la parte inferior de la ventana principal. No obstante, el usuario puede optar por activar o desactivar cualquier modelo de simulación antes de ejecutar el experimento.[3,7]

A continuación se va a explicar cómo GETRAM modela los consumos de combustible y las emisiones, describiendo sus requisitos de entrada y la salida generada.

### **6.8.1. Modelo de consumo de combustible.**

Para el consumo de combustible, AIMSUN asume que cada vehículo puede estar al ralentí, a velocidad constante, acelerando o desacelerando. Para cada vehículo se analiza su estado y se le aplica la fórmula correspondiente para calcular su gasto.

Para el ralentí y la desaceleración de los vehículos, puede suponerse que el gasto es constante con el tiempo medido en mililitros por segundo, ml/s.

Para una aceleración, según estudios [9], el gasto por cada vehículo se calcula según la siguiente fórmula:

$$Fa = c_1 + c_2 \cdot a \cdot v$$

Donde  $c_1$  y  $c_2$  son constantes y  $a$  y  $v$  son la aceleración y la velocidad del vehículo respectivamente.

En el caso de que el vehículo se encontrara a velocidad constante, la fórmula que GETRAM utiliza es la siguiente:

$$\frac{dF}{dt} = k_1 \left( 1 + \frac{v^3}{2v_m^3} \right) + k_2 v$$

Donde  $F$  es el gasto de combustible, y  $t$  el tiempo. Contiene tres constantes:  $k_1$ ,  $k_2$ , y  $v_m$ , que deben establecerse de forma empírica para cada tipo de vehículo.

$v_m$  es la velocidad a la que el consumo de combustible por kilómetro es mínimo. Normalmente, suele estar alrededor de los 50 km/h.

Las constantes  $k_1$  y  $k_2$  pueden ser calculadas a partir del consumo de combustible por cada 100 km a 90 km/h y a 120 km/h. El Departamento Británico de Transporte [10], demostró que para vehículos nuevos estas constantes se calculan como:

$$k_1 = \frac{(F_1 - F_2) v_1 v_2 v_m^3}{180 (2v_2 v_m^3 - 2v_1 v_m^3 + v_2 v_1^3 - v_1 v_2^3)}$$

$$k_2 = \frac{2F_2 v_2 v_m^3 - 2F_1 v_1 v_m^3 + F_2 v_2 v_1^3 - F_1 v_1 v_2^3}{360 (2v_2 v_m^3 - 2v_1 v_m^3 + v_2 v_1^3 - v_1 v_2^3)}$$

Siendo  $F_1$  y  $F_2$ , las tasas de consumo de combustible para un vehículo que circule a unas velocidades constantes  $v_1$  y  $v_2$ , respectivamente. Habitualmente  $v_1$  se toma a 90km/h y  $v_2$  a 120 km/h reduciéndose las ecuaciones anteriores a:

$$k_1 = \frac{v_m^3 (R_1 - R_2)}{v_m^3 - 1134000}$$

$$k_2 = \frac{1458000R_2 - 2592000R_1 + 4v_m^3R_2 - 3v_m^3R_1}{360 \{v_m^3 - 1134000\}}$$

Siendo  $R_1$  y  $R_2$  el gasto de combustible medido en litros por cada 100 km, para velocidades constantes de 90 y 120 km/h respectivamente. Estos datos son sencillos de obtener.

El combustible consumido durante un tiempo  $t$  de simulación será calculado, para cada vehículo, en función de su estado por medio de las fórmulas que aparecen en la tabla 6.8.1.

Estado del vehículo	Consumo de combustible (ml/s) en $\Delta t$
Al ralentí.	$F_i \Delta t$
Acelerando con aceleración "a" (m/s/s) y velocidad "v" (m/s).	$(c_1 + c_2 av) \Delta t$
A velocidad constante "v" (m/s).	$(k_1 (1 + (\frac{v}{v_m})^3) + k_2 v) \Delta t$
Decelerando.	$F_d \Delta t$

*Tabla 6.8.1: Obtención del gasto de combustible.*

### 6.8.1.1 Parámetros de entrada.

Para cada tipo de vehículo, se han de definir los siguientes cinco parámetros. Estos especifican la tasa de consumo de combustible del vehículo:

- $C_1$  y  $C_2$ : las dos constantes en la ecuación para el consumo de combustible durante la aceleración del vehículo, en milímetros por segundo, ml/s.
- $F_1$ : la tasa de consumo de combustible, en litros por cada 100 km, para los vehículos que circulen a una velocidad constante de 90 km/h.
- $F_2$ : la tasa de consumo de combustible, en litros por 100 km, para los vehículos que circulen a una velocidad constante de 120km/h.
- $V_m$ : la velocidad a la que la tasa de consumo de combustible, en ml/s, es mínima para un vehículo circulando a velocidad de crucero.
- $F_i$ : la tasa de consumo de combustible para vehículos al ralentí en ml/s.
- $F_d$ : la tasa de consumo de combustible durante las desaceleraciones, frenadas en ml/s.

### Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.

Para cada tipo de vehículo se buscaron valores de estos parámetros [10,11], que se muestran en la siguiente tabla:

Tipo de vehículo	Fi (ml/s)	C1 (ml/s)	C2 (ml/s)	F1 (l/100km)	F2 (l/100km)	Fd (ml/s)	Vm (km/h)
Ligeros	0,33	0,42	0,26	4,7	6,5	0,54	60
Autobuses/ autocares	3	1	0,5	14	18	3,5	50
Motos	0,15	0,21	0,13	3	5	0,26	70
Taxis	0,33	0,42	0,26	4	6	0,54	60
Pesados	3	1	0,5	10	12	3,5	60

*Tabla 6.8.2: Valores del consumo de combustible para cada tipo de vehículo.*

En el programa TEDI, estos datos se introducen a través de la pestaña “fuel”, que aparece en la figura 6.8.1, como ejemplo.

The screenshot shows a software window titled "Vehicle Types (MODEL)". It contains a list of vehicle types: "bus", "car1", "motorbike", and "Peaton". The "bus" type is selected. To the right of the list are buttons: "New", "Delete", "Duplicate", and "To Lib". Below the list is an "Attributes" section with a "Name" field containing "bus". There are three tabs: "Parameter", "Classes", and "Fuel". The "Fuel" tab is active, showing a "Consumption rate" section with the following fields: "Fi (idling):" with value 3.00 ml/s, "C1 (accelerating):" with value 1.00 ml/s, "C2 (accelerating):" with value 0.50 ml/s, "F1 (at 90 Km/h):" with value 14.00 l/100Km, "F2 (at 120 Km/h):" with value 18.00 l/100Km, and "Fd (decelerating):" with value 3.50 ml/s. Below this is a "Minimum consumption speed" section with a "Vm:" field containing 50.00 Km/h. At the bottom are "OK" and "Cancel" buttons.

*Figura 6.8.1: Pantalla de introducción de valores combustible en el editor TEDI.*



## **6.8.1.2 Salida.**

Los datos de salida del modelo, para cada nivel de agregación, son los siguientes:

- Para toda la red, la distancia total recorrida (en km) y el total de combustible consumido, en litros, de todos los vehículos que hayan terminado su ruta. Es decir, que hayan llegado a un centroide de destino.
- Para cada sección e intersección, el total de kilómetros recorridos por todos los vehículos que han cruzado cada sección e intersección. Además, contempla el total, en litros, del combustible consumido por la suma de todos estos vehículos.
- Para cada ruta, la distancia total recorrida (en km). Este modelo, así mismo, facilita el total del combustible consumido (en litros) por todos los vehículos que han seguido ese camino.

En capítulos posteriores se analizarán estos datos en detalle.

## **6.8.2. Modelo de emisión de contaminación.**

AIMSUN puede modelar las emisiones de contaminantes para todos los vehículos de la simulación. Al igual que en el modelado de consumo de combustible, el vehículo debe estar en alguno de los cuatro estados posibles (ralentí, velocidad constante, acelerando o desacelerando). Conociendo la velocidad del vehículo y su aceleración se pueden evaluar sus emisiones en cada paso de la simulación.

Para el cálculo de emisiones GETRAM no utiliza fórmulas dependientes de la velocidad y de la aceleración que puedan relacionar cada estado del vehículo con su emisión. Para cada uno de los cuatro estados la emisión de contaminantes considera constante con el tiempo, como ocurre con el gasto de combustible en el estado de ralentí. Estos valores son diferentes para cada contaminante, para cada estado y para cada tipo de vehículo. Para ser más precisos en la estimación GETRAM permite que, para el estado de velocidad constante, no exista un valor único independiente de la velocidad si no una lista de pares de puntos velocidad (km/h) - emisión contaminante (g/s).

La obtención de estos datos es tediosa, ya que al no emplear fórmulas han de ser recogidos de experimentos empíricos. Además se necesita una mayor cantidad de valores para que la estimación sea precisa. En definitiva, estos datos son más difíciles de conseguir por ser parámetros muy concretos y específicos que solo pueden ser obtenidos en estudios de laboratorio.

Para el caso de estudio, por ser los más utilizados, se van a estudiar tres clases de contaminantes: el monóxido de carbono, los óxidos de nitrógeno y los hidrocarburos sin quemar

### **6.8.2.1 Parámetros de entrada.**

Los datos requeridos para cada tipo de vehículo (es decir, vehículos ligeros, motos, autobuses/autocares y vehículos pesados) y por cada contaminante del modelo (es decir, CO, NO<sub>x</sub>, HC), son los siguientes:

1. La tasa de emisión de los vehículos al acelerar, en g/s.
2. La tasa de emisión de los vehículos al frenar, en g/s.
3. Tasa de emisión para vehículos en ralentí, g/s.
4. Una lista para los vehículos a velocidad constante. Ésta, consiste en un conjunto de pares de puntos de velocidad (km/h) y tasa de emisión (g/s), hasta un máximo de 15 puntos.

Los valores necesarios para los vehículos ligeros y autocares han sido obtenidos de QUARTET 1992 [12]. Se ha considerado para la simulación que taxis y vehículos ligeros tienen los mismos valores. Ésto mismo se ha tenido en cuenta para autocares, autobuses y vehículos pesados. A continuación se muestran los datos obtenidos, en tablas:

Tasa de emisión	CO (g/s)	NOx (g/s)	HC (g/s)
Durante el ralentí	0,0600	0,0008	0,0067
Al acelerar	0,3770	0,0100	0,0200
Al frenar	0,0720	0,0050	0,0067
A velocidad constante			
10 km/h	0,0600	0,0006	0,0063
20 km/h	0,0910	0,0006	0,0078
30 km/h	0,1300	0,0017	0,0083
40 km/h	0,1290	0,0022	0,0128
50 km/h	0,0900	0,0042	0,0097
60 km/h	0,1100	0,0050	0,0117
70 km/h	0,1770	0,0058	0,0014

*Tabla 6.8.3: Valores de emisiones para vehículos ligeros y taxis.*

Tasa de emisión	CO (g/s)	NOx (g/s)	HC (g/s)
Durante el ralentí	0,050	0,005	0,038
Al acelerar	0,377	0,010	0,020
Al frenar	0,072	0,001	0,007
A velocidad constante			
10 km/h	0,097	0,018	0,078
20 km/h	0,056	0,020	0,044
30 km/h	0,050	0,023	0,042
40 km/h	0,069	0,036	0,056
50 km/h	0,056	0,067	0,078
60 km/h	0,042	0,083	0,067
70 km/h	0,000	0,133	0,067

*Tabla 6.8.4: Valores emisiones para vehículos pesados, autobuses y autocares.*

Como ejemplo de cómo se introducen estos datos a continuación se muestra la figura 6.8.2 con los pares de puntos velocidad - tasa de emisión para el CO para los vehículos ligero.

**Vehicle Types (MODEL)**

Vehicle Types

- bus
- car1**
- motorbike
- Peaton

Attributes

Name: car1

Parameter Classes Fuel Pollutants

Name	IER (g/s)	AER (g/s)	DER (g/s)
CO	0.0600	0.3770	0.0720
NOx	0.0010	0.0100	0.0010
HC	0.0070	0.0200	0.0070

CO: 0.0600 0.3770 0.0720

Cruising Rates

Speed Km/h	Emission Rate (g/s)
10.0000	0.0600
20.0000	0.0910
30.0000	0.1300

New Pair Delete Pair

New Pollutant Delete Pollutant

OK Cancel

*Figura 6.8.2: Emisión de contaminantes para vehículos ligeros.*

### 6.8.2.2 Salida.

Al igual que en el caso del consumo de combustible, los resultados se presentan en distintos niveles de agregación:

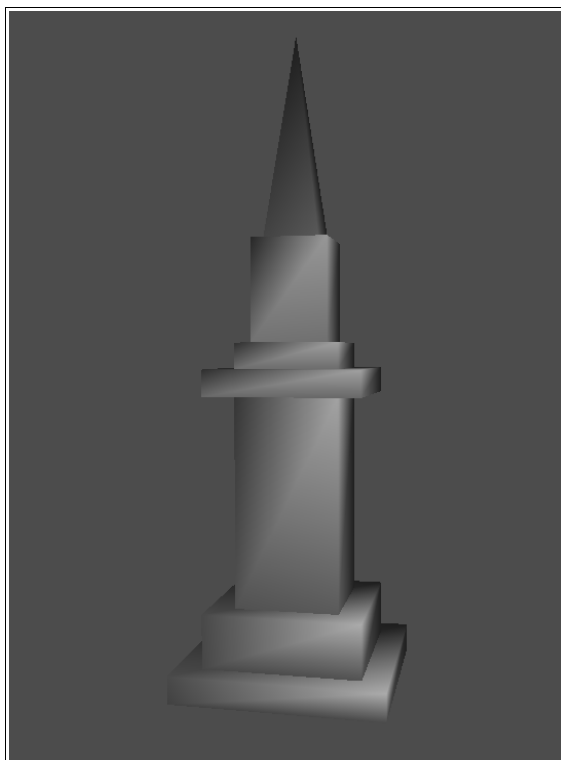
- Para la totalidad de la red: los kilogramos de cada contaminante emitidos por todos los vehículos que hayan podido finalizar su ruta.
- Para cada sección e intersección: el total de kilogramos emitidos, de cada contaminante, por el total de los vehículos que pasaron a través de esas secciones e intersecciones.
- Para cada ruta: los kilogramos, de cada uno de los contaminantes, emitidos por todos los vehículos que siguieron esa ruta.

## **6.9. SIMULACIÓN.**

El siguiente paso, después de introducir todos los datos referentes a la geometría de la red control y datos de los vehículos, es simularla. En este apartado, se abordarán los aspectos relacionados con la simulación tanto en dos dimensiones como en tres.

### **6.9.1. Simulación en dos dimensiones.**

Para la simulación en 2 dimensiones se utiliza el bloque AIMSUN dentro del programa GETRAM como ya se explicó en el capítulo de “Aplicaciones Informáticas”. Este paso viene inmediatamente después de haber llevado a cabo la definición de la geometría, los flujos de



*Figura 6.9.1: Pirámide 3DS.*

vehículos, el plan de control, las líneas de transporte público y el ajuste de parámetros tanto de los vehículos como de la red.[7]

AIMSUN no es únicamente un simulador gráfico si no que además proporciona datos numéricos importantes. Al igual que ocurría con el editor TEDI, para el correcto uso de este módulo se deben seguir ciertos pasos:

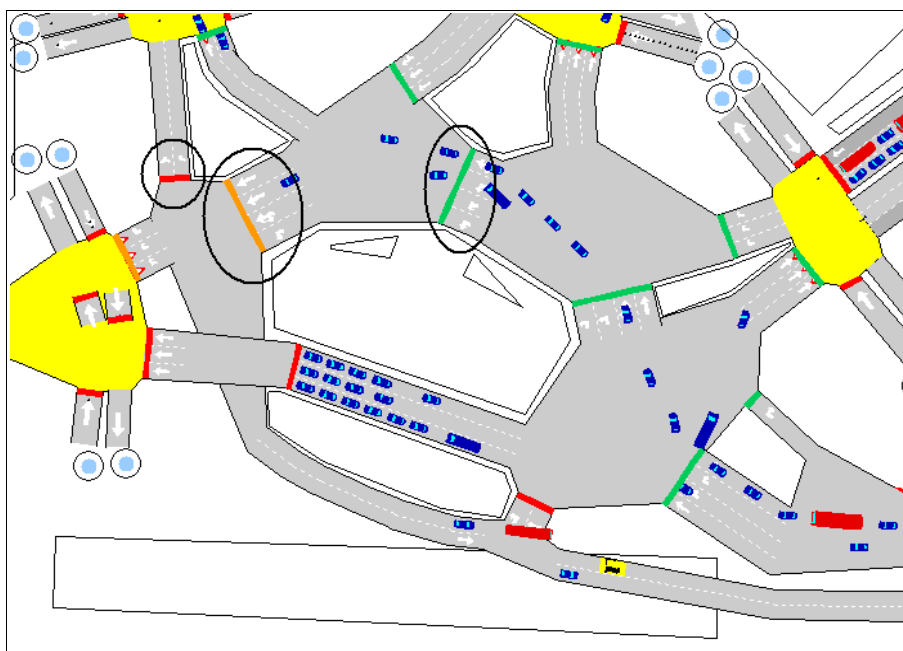
1. Cargar el escenario de la simulación. Esto incluye la red (*network*), los flujos de vehículos, el plan de control y el plan de trasportes. Con estos parámetros se puede guardar lo que GETRAM denomina escenario (*scenario*), que cumple los requisitos mínimos para que AIMSUN o AIMSUN 3D pueda simularlo.
2. Opciones previas. Tales como tiempos de simulación o los datos que se quieren obtener.
3. Simulación. A la hora de simular existen varias velocidades, pero para simulaciones largas es preferible simular lo más rápido posible, interpretar los resultados y hacer hincapié en los periodos más problemáticos.
4. Resultados. Tras la simulación se pueden ver los resultados, tanto gráficos como numéricos. Los resultados son muy variados y se pueden definir para diferentes grados de agregación, desde una sola sección hasta la red entera.
5. Validación. Se trata de una herramienta para comprobar que los resultados obtenidos no han sido fruto de la casualidad. AIMSUN se vale de repeticiones (*replications*) de la simulación partiendo de distintas semillas con el objetivo de que si la red se ha modelado correctamente los datos obtenidos deben ser similares.

En este capítulo se abordarán los puntos dos y tres, las opciones previas y la simulación, tanto para AIMSUN como para AIMSUN 3D. En el próximo capítulo se tratarán los dos últimos puntos, los resultados y la validación.

### **6.9.1.1 Carga del escenario.**

Visualmente antes de comenzar la simulación el aspecto de la red es muy similar al del editor TEDI (figura 6.9.1.), con la diferencia de que aquí no hay ninguna opción para editar, solo algunas opciones sobre la visualización, la simulación y los datos de que se obtendrán de la misma.





*Figura 6.9.3: Detalle de las luces semáforicas durante la simulación en dos dimensiones.*

Estos semáforos visualmente ofrecen una realimentación que permite averiguar si se configuró bien el plan de control o por el contrario se crean colapsos, giros incompatibles, etc... ya que en el editor TEDI esto es poco intuitivo y es difícil encontrar fallos. Además seleccionando las intersecciones se puede seguir su plan de control en tiempo real, aunque no modificarlo.

El color de los vehículos es configurable, según se quiera ver unas cosas u otras. Por ejemplo, se puede configurar que el color del vehículo dependa de su tipo, o de si se trata de transporte público, o dependiendo de la ruta que lleve. Las posibilidades son muchas pero sólo sirven para dar información visual, no influyen para los datos estadísticos.

No obstante este simulador también permite representación instantánea de algunos parámetros de la red, como la densidad en las vías e intersecciones, velocidades, colas... aunque siempre dando representaciones visuales, mediante colores, y no valores concretos. También se puede conocer los detalles de vehículos concretos seleccionándolos, o seguirlos a través de la red de manera automática con la opción *follow*.

AIMSUN, permite variar la velocidad de simulación para que los vehículos circulen más rápido, de manera que horas de simulación en tiempo real puedan convertirse en minutos. La opción de velocidad máxima se denomina *batch*, esta opción tiene el inconveniente de que se deja de ver la red para que el ordenador trabaje más rápido. Aproximadamente una hora en tiempo real con esta opción dura unos 15 segundos, dependiendo del valor del *reaction time*.



Los datos estadísticos se consiguen al final de la simulación y se pueden obtener de muy diversas formas y niveles de agregación. Pueden representarse algunos de ellos gráficamente, ya sea mediante representaciones de pares de puntos o por mapas de colores de la red. Sobre los datos estadísticos se hablara con más detalle en el capítulo de resultados.

### **6.9.1.2 Parámetros a definir dentro de simulador AIMSUN.**

En el simulador AIMSUN se pueden, y se deben, definir ciertos parámetros importantes previos a la simulación.[2,7]

- *Reaction time*: además de ser el tiempo de reacción de los conductores, representa la unidad de tiempo mínima de simulación ( *simulation step*) los valores típicos se encuentran en el intervalo entre 0,75 y 1 segundo.
- *Reaction time at stop*: es el tiempo que tarda un vehículo parado en reaccionar al inicio de la marcha del vehículo precedente.
- *Queuing up speed*: los vehículos cuya velocidad es menor de este valor se considera que están parados y forman parte de una cola (*queue*).
- *Queue leaving speed*: los vehículos que están parados en una cola dejan de formar parte de ella cuando su velocidad supera este valor.
- *Percent overtake*: representa, en tanto por uno, el porcentaje de la velocidad deseada a la que ha de circular el vehículo precedente por debajo de la cual el vehículo seguidor decide adelantarlo. La velocidad deseada es la velocidad a la que puede circular el vehículo según sus características (*vehicle type*) y las de la vía.
- *Percent recover*: representa el porcentaje, en tanto por uno, de vehículos que después de un adelantamiento retornan al carril original.

## **6.9.2. Simulación 3D.**

Para la simulación 3D se emplea el módulo AIMSUN 3D de GETRAM [8]. Esta herramienta permite ver las redes editadas en TEDI en escenarios tridimensionales.

Los componentes tridimensionales necesarios pueden importarse de la biblioteca de AIMSUN 3D o se pueden diseñar nuevos componentes y añadirlos. Por las particularidades del escenario real que se ha simulado en este proyecto, la mayoría de los componentes existentes en la biblioteca no se consideraron adecuados, por lo que fue necesario diseñarlos.

### **6.9.2.1 Creación de figuras 3D.**

Para la realización de figuras 3D se utilizó el programa informático 3D Studio. Con esta herramienta se crearon figuras características de la glorieta de las Pirámides, como las propias pirámides, fuentes, entradas de metro o las marquesinas de las paradas de autobús.. Su construcción se realizó a partir de la unión de piezas sólidas más sencillas, como cubos, tetraedros, cilindros o piezas toroidales.

Para los posibles proyectos futuros, se debe saber que la versión 6 de 3D Studio, no crea figuras con extensión .3DS, que es la que utiliza GETRAM, si no que hay que exportarlas a esta extensión. Este programa tiene muchas posibilidades dentro del ámbito de los modelos 3D y es utilizado por varias empresas informáticas para la creación de texturas 3D, pasando por decorados y personajes de videojuegos, hasta películas de animación. Por tanto el uso del programa no es sencillo y llevaría demasiado tiempo el saber usar todas sus herramientas y posibilidades, que son muchas.

Este aprendizaje se escapa de los objetivos de este proyecto, pero no la parte más directa sobre el modo de importar las imágenes al formato 3DS. Los pasos para importar imágenes son los siguientes:

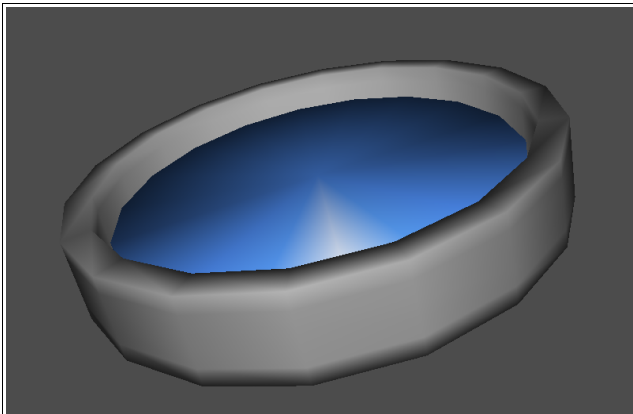
- Creación del modelo: es aconsejable hacerlo lo más sencillo posible sin demasiados detalles, más que por su complicación, porque si su tamaño digital resulta muy alto el programa GETRAM no lo dibuja de manera correcta o la simulación resulta ser excesivamente lenta.
- Se deben seleccionar todas las piezas que forman la figura completa. Pinchando con el botón derecho del ratón se despliega un menú, se deben elegir las opciones para que divida la figura en polígonos, planos o elementos sólidos. Si este paso se ha hecho bien, en la barra lateral derecha debería aparecer un contador con el número total de polígonos, planos o elementos sólidos que componen la figura.

### *Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.*

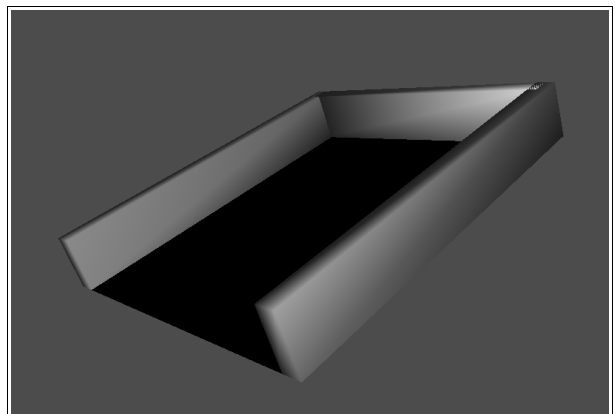
- *Renderizar* dichos elementos que se guardaran en una ubicación a elección del usuario.
- En la pestaña de archivo seleccionar “*importar a 3DS*”. No es necesario guardar la figura en alguno de los formatos de 3D Studio, pero es MUY importante tener seleccionados todos los elementos de la figura antes de importarla.

Con 3D Studio a las figuras se les puede dar sombras, iluminación, texturas, movimientos... pero, al exportar mucha de esa información se pierde, de forma que, no puede existir ningún tipo de movimiento y las texturas deben ser de cualquier color, pero solo monocromáticas, es decir, no se pueden importar patrones ni texturas de varios colores.

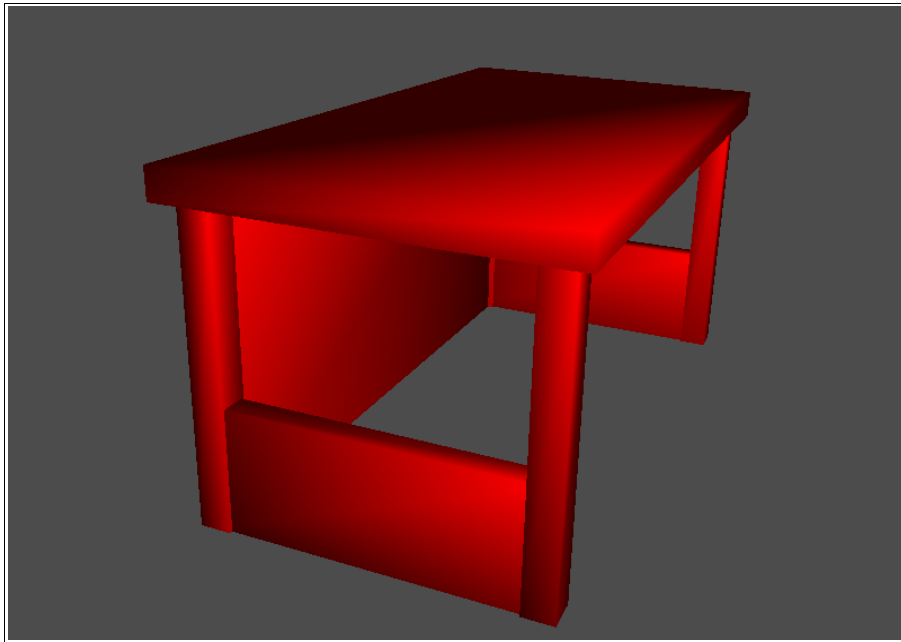
Los modelos 3D que se diseñaron para este proyecto aparecen en las figuras de la 6.9.3 a la 6.9.6.



*Figura 6.9.4: Fuente 3DS.*



*Figura 6.9.5: Entrada de metro 3DS.*



*Figura 6.9.6: Parada de autobús 3DS.*

Se puede ver que estas figuras tiene bastantes detalles, como sombras o los cantos romos en la fuente, que GETRAM omite completamente y no se aprecian.

### 6.9.2.2 AIMSUN 3D.

El módulo AIMSUN 3D es el que lleva a cabo la simulación 3D. Para poder llevar a cabo esta acción previamente se ha tenido que crear lo que GETRAM denomina “*scenario*”. Este archivo no es más que la unión de los parámetros geométricos de la red, la matriz O/D, el plan de control y el plan de transportes en un único archivo que se confecciona en el módulo AIMSUN. La simulación 3D puede llevarse a cabo de dos formas[2]:

- Modo online: se simula en tiempo real con los datos que se tienen en el archivo *scenario* (extensión .sce).
- O a partir de una simulación anterior que haya sido guardada, con lo que más que simular es simplemente reproducir.

En general, como se verá en el próximo capítulo de validación, las diferencias entre 2 simulaciones a partir de mismo *scenario* son mínimas. Sólo son distintas por las características estocásticas que tienen los simuladores microscópicos.

Dentro de este módulo tridimensional, las únicas opciones que se pueden variar son aspectos visuales del entorno. Un ejemplo de esto podría ser la existencia de niebla y la iluminación; o también, aspectos de los vehículos, color, tamaño, forma... Con la representación 3D se pueden ver las texturas de los materiales o las formas 3D que se crearon con el programa 3D Studio que hasta ahora no se podían ver.

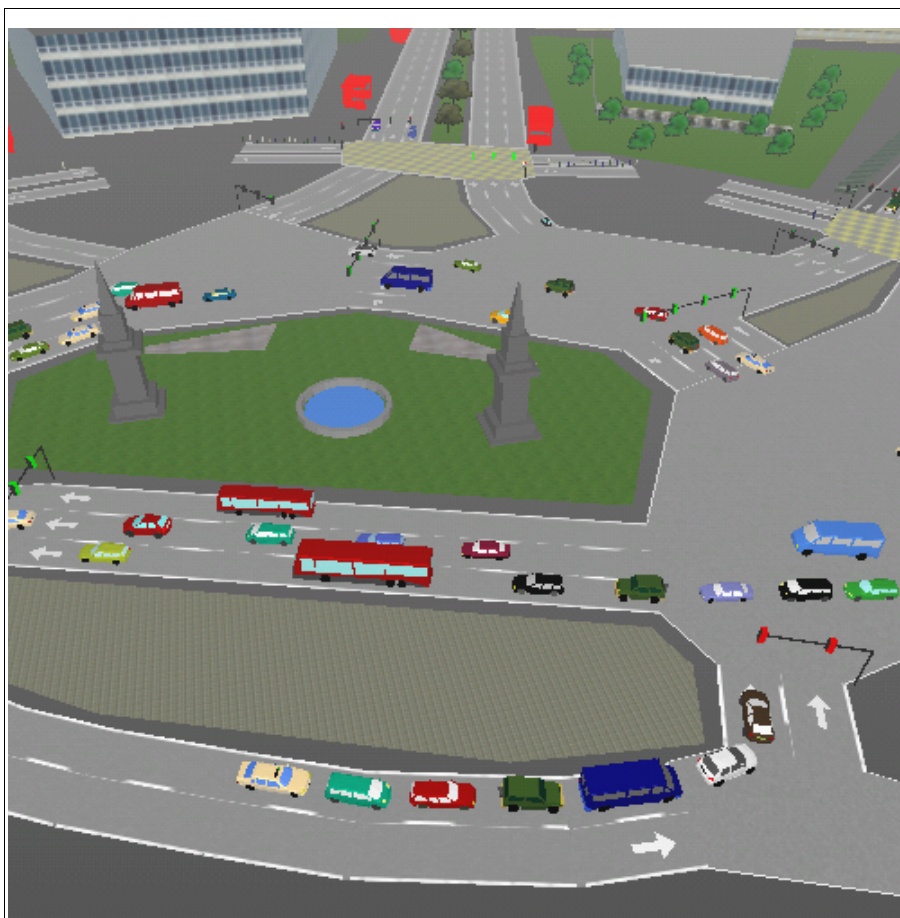
Durante el diseño de nuevos modelos tridimensionales se observó que algunas figuras no aparecían en el entorno tridimensional tal y como habían sido diseñadas. Al introducir un modelo 3D dentro del *scenario*, uno de los parámetros es la escala. Se pudo comprobar que para escalas menores de 0,7 los modelos pierden completamente los efectos de luz, y por tanto las sombras. Además, con escalas muy pequeñas, modelos como la fuente que es circular y está formada por más de 600 polígonos, estos se superponen y deja de tener aspecto circular. La solución, por tanto, es realizar modelos pequeños para así no tener que utilizar escalas reductoras.

AIMSUN 3D se apoya en el uso de cámaras para permitir al usuario desplazarse por la red. Consta de tres cámaras por defecto, cada una de ellas paralela a uno de los tres ejes cartesianos del espacio. Adicionalmente, se pueden incluir nuevas cámaras con la posición y dirección que se elija; bien en el editor TEDI o en el mismo simulador AIMSUN 3D.

AIMSUN 3D también permite definir posiciones espaciales para luego crear caminos, que pueden ser seguidos por una cámara. También existe la posibilidad de crear una cámara que siga la trayectoria de un vehículo durante su recorrido por la red.

### *Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.*

En la figura 6.9.7 se puede ver una imagen de como es el entorno 3D visualizado a través de AIMSUN 3D.



*Figura 6.9.7: Glorieta en tres dimensiones.*

## **7. RESULTADOS Y VALIDACIÓN.**

El entorno tridimensional tiene un objetivo meramente estético, ya que todos los resultados de la simulación se obtienen del entorno en dos dimensiones. GETRAM ofrece una gran variedad de datos, todos ellos en diferentes agregaciones e intervalos de tiempo. Las dos primeras clasificaciones dividen los resultados en gráficos (resultados globales de toda la red mediante uso de colores y representaciones de pares de puntos) y numéricos. Estos últimos son los que más información cuantitativa ofrecen, por su mayor variedad y porque se pueden obtener datos de la red completa, o de una sola sección, de un giro, de una ruta o de una línea de autobús.

Los datos son muy variados, y se agrupan en la siguiente clasificación

- |                               |  |
|-------------------------------|--|
| - Flujo de vehículos (veh/h). | - Número de paradas.                     |
| - Densidad (veh/km).          | - Velocidad (m/s).                       |
| - Tiempo de viaje (s).        | - Tiempo de espera (s).                  |
| - Tiempo de retraso(s).       | - Tamaño de las colas (nº de vehículos). |
| - Combustible consumido (l).  | - Contaminantes emitidos (kg).           |

Además, estos datos se pueden agrupar por tipos de vehículo o para el total de todos ellos. Si la simulación está dividida en intervalos, se pueden obtener datos para cada intervalo (*periodic*), o para el total del tiempo de simulación. (*global*).



## 7.1. VALIDACIÓN.

Antes de exponer los resultados obtenidos del modelo, se ha realizado una validación del mismo para comprobar la veracidad de sus resultados.

La validación consiste en determinar si el modelo conceptual de simulación (en oposición al programa de ordenador) es una representación exacta del sistema real en estudio. Si un modelo es válido, entonces las decisiones tomadas a partir de dicho modelo deberían ser similares a las que se tomarían al experimentar físicamente con el sistema (si esto fuera posible).[2,7]

Un modelo es creíble cuando sus resultados son aceptados por el usuario, y se utilizan como ayuda en la toma de decisiones.

La **verificación** de modelos consiste en la determinación de que un programa de ordenador realiza la simulación de la forma prevista. Es decir, depurar el programa de ordenador. Dicha verificación, por lo general, implica correr el modelo de simulación varias veces ajustando los parámetros de entrada y comprobando que la salida es cada vez más razonable.

La animación también puede ser de gran ayuda para este fin. Con algunos tipos de modelos de simulación (los modelos de tráfico son un buen ejemplo), puede ser útil para observar si el modelo de la simulación está trabajando como se espera. Esto quiere decir observar si aparecen congestiones donde en la realidad existen, colas, etc. Por esta razón, la animación también puede ser una forma eficaz de evaluar (por lo menos cualitativamente) la validez de un modelo de simulación.

Durante la validación de un modelo de simulación, hay que tener en cuenta que:

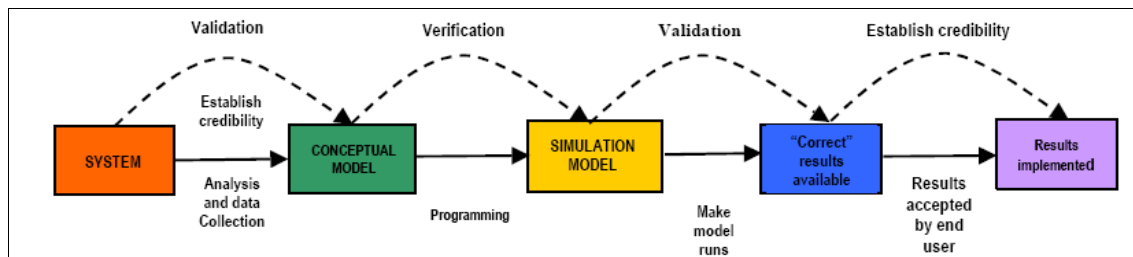
- Un modelo de simulación de un sistema complejo, sólo puede ser **una aproximación** a la realidad del sistema, independientemente de cuánto esfuerzo se pone en el desarrollo del modelo. No hay nada tan válido como el modelo real.
- Un modelo de simulación debe ser siempre para un conjunto particular de objetivos.
- Un modelo de simulación debe ser validado, al menos ,con respecto a las medidas de rendimiento que representen los objetivos particulares.
- Durante el estudio de simulación, es necesario que tanto el desarrollo como la validación se hagan de manera conjunta.

Law y Kelton [13] proponen un enfoque en tres etapas para la elaboración de modelos creíbles

y válidos de simulación.

1. Desarrollar un modelo de apariencia válida. Esto quiere decir que, de manera global los resultados sean razonables para personas que tengan conocimientos sobre el sistema en estudio. El analista debe ser ingenioso para obtener toda la información necesaria. Si los datos existen, deben ser obtenidos y utilizados para la construcción del modelo. Se debe tener cuidado para garantizar que los datos son correctos y representativos de lo que se inspira.
2. Prueba de los supuestos del modelo empírico. Análisis de sensibilidad: Determinar si los datos de salida de la simulación cambian significativamente cuando el valor de un parámetro de entrada se cambia, cuando una distribución de probabilidad de entrada varía, o cuando el nivel de detalle de un subsistema ha sufrido alguna modificación.
3. Determinar el grado de representatividad de los datos de salida. La prueba definitiva para que un modelo de simulación sea válido, resulta ser cuando los datos de salida del modelo se asemejan a los datos que cabría esperar que se obtuvieran del sistema real. Dado que el modelo es sólo una "aproximación" al sistema real, una hipótesis de que el modelo y el sistema es el "mismo" es falsa. Es más real preguntarse si, realmente, las diferencias entre el sistema y el modelo son lo suficientemente significativas como para afectar a las conclusiones derivadas de la simulación.

La metodología propuesta por la Law y Kelton para validar, verificar y establecer la credibilidad de un modelo de simulación se resume en la figura 7.1.1.



*Figura 7.1.1: Resumen de pasos de la validación.*

Se debe entender que la **validación** es un proceso de pruebas para que el modelo represente una alternativa a la experimentación real. Para que esto se cumpla, se requiere un ejercicio de **calibración** del modelo, ajustando los parámetros del modelo hasta que el resultado sea similar a lo observado en el sistema.

Según esta lógica, cuando los resultados de la comparación de análisis no son aceptables para el grado de importancia definido por el analista, el rechazo de los resultados de la simulación implica la necesidad de volver a calibrar algunos aspectos del modelo de simulación ajustando algunos parámetros.

La parte de calibración se ha ido desarrollando paralelamente con el resto de la simulación. Para ello se ha prestado especial atención a las partes del modelo que no concordaban con la realidad. En el caso de la glorieta de las Pirámides, se recogieron estos datos de salida tanto visualmente, observando las animaciones, como numéricamente. Sobre este proceso se explicaron los problemas de los pasos de peatones en el apartado “Introducción a los pasos de peatones”, pero debido a que fueron muchos ajustes durante su desarrollo, no se va redactar un apartado con todas las modificaciones.

Además, la calibración también resulta útil, no solo para buscar alternativas que hagan que el modelo resulte más fiable y creíble, sino que también es una herramienta de detección de fallos. Por ejemplo, durante las simulaciones se detectaron errores entre la simulación y los datos reales de casi el 60%. La razón fue que al introducir los datos en la matriz O/D muchos de ellos eran incorrectos, y gracias a la calibración se encontró el fallo y se solucionó.

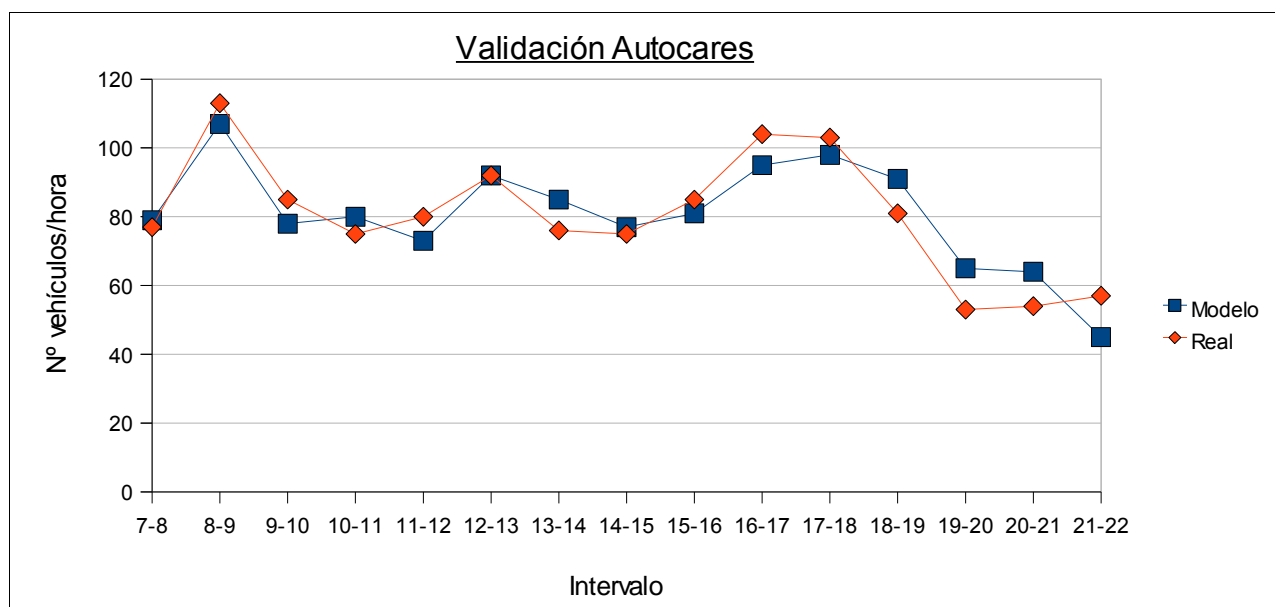
En el último paso de la validación, es necesario comparar los resultados obtenidos en las distintas simulaciones entre sí y estos mismos resultados con los datos reales que se conocen del sistema. Es entonces cuando se aceptará el modelo como representación de la realidad y, por tanto, existirá credibilidad como para afirmar que los resultados obtenidos en la simulación son aceptados para obtener conclusiones del sistema real y aplicarlos en la toma de decisiones. Se considerará que un modelo es válido si el error porcentual del número vehículos que circulan a través de la red es hasta un 5% mayor o menor que en la realidad. Asimismo, y ya que se dispone de los datos por intervalos de una hora, la distribución de las intensidades horarias del modelo debe ser objetivamente parecida a la de la realidad. Cumpliendo estos dos requisitos se dará por válido el modelo.

### 7.1.1. Datos para la validación.

Para poder validar el modelo deben contrastarse los datos reales, con datos simulados y comparar que se extraen resultados parecidos. Del modelo real sólo se dispone de los datos de aforos de la glorieta, por lo que deben compararse con los aforos de la simulación.

Para ello, se han seleccionado los datos referentes al flujo de vehículos por cada una de las cinco entradas a la glorieta, para cada intervalo de tiempo. El flujo tiene unidades de vehículos por hora, y los intervalos de tiempo son de una hora, por lo tanto, el flujo de vehículos en cada intervalo se corresponde con el número total de vehículos. Los datos para cada tipo de vehículo y hora son los siguientes:

Para Autocares:



*Figura 7.1.2: Validación autocares.*

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	TOTALES
Real	77	113	85	75	80	92	76	75	85	104	103	81	53	54	57	1210
Modelo	79	107	78	80	73	92	85	77	81	95	98	91	65	64	45	1210
Diferencia	2	-6	-7	5	-7	0	9	2	-4	-9	-5	10	12	10	-12	0
Porcentaje	2,6	-5,31	-8,24	6,67	-8,75	0	11,84	2,67	-4,71	-8,65	-4,85	12,35	22,64	18,52	-21,05	0

*Tabla 7.1.1: Validación autocares.*

### Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.

En los datos de la tabla se puede ver que el número de autobuses que circulan por la glorieta, en el modelo, coincide exactamente con la realidad. Se podría decir que el modelo refleja lo que ocurre en la realidad de manera casi idéntica, si no fuera porque lógicamente existen algunas diferencias en algunos intervalos, sobretodo en la parte final de 7 de la tarde a 10 de la noche.

Taxis:

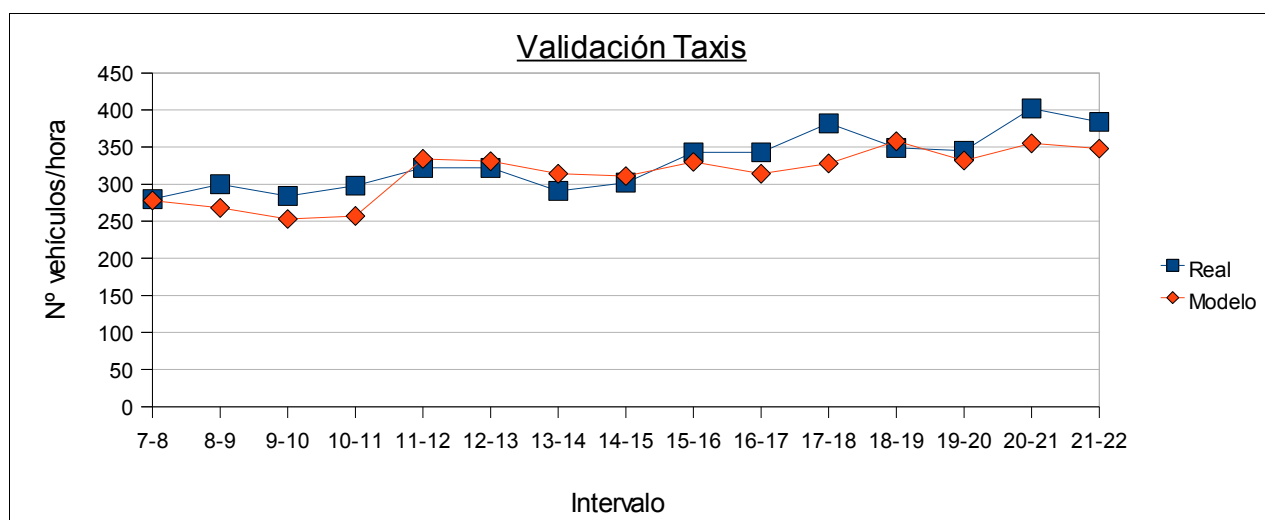


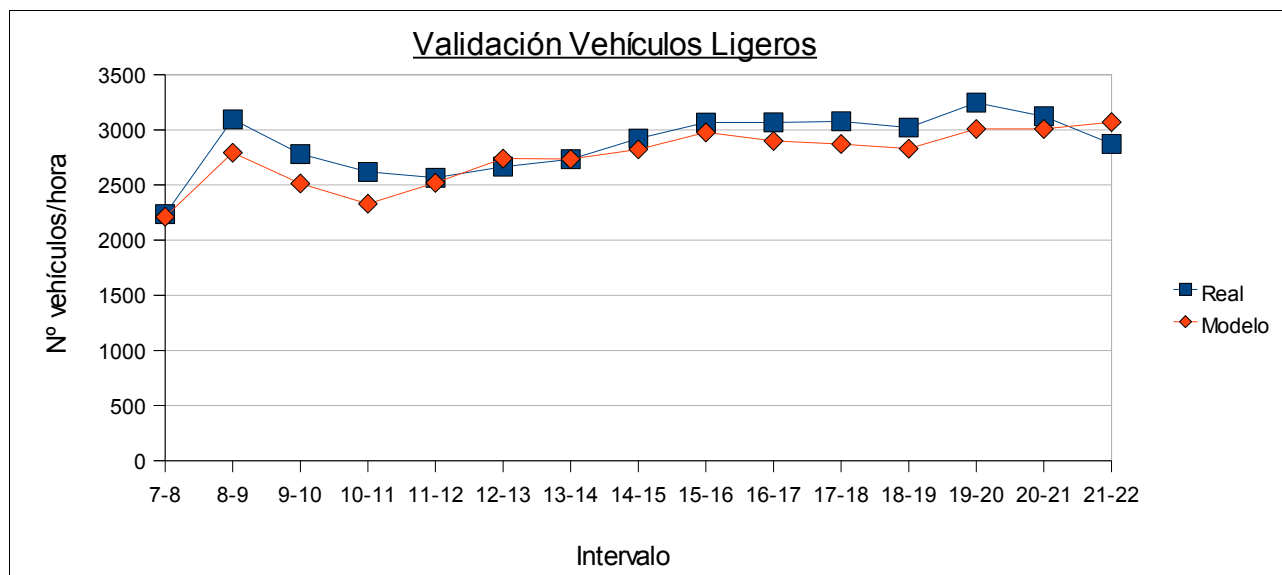
Figura 7.1.3: Validación taxis.

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	TOTALES
Real	280	300	284	298	322	322	291	302	343	343	382	349	345	402	384	4947
Modelo	278	268	253	257	334	331	314	311	330	314	328	358	332	355	348	4711
Diferencia	-2	-32	-31	-41	12	9	23	9	-13	-29	-54	9	-13	-47	-36	-236
Porcentaje	-0,71	-10,67	-10,92	-13,76	3,73	2,8	7,9	2,98	-3,79	-8,45	-14,14	2,58	-3,77	-11,69	-9,38	-4,77

Tabla 7.1.2: Validación taxis.

Este tipo de vehículos tiene un cierto error global, aunque menor al 5%, lo cual es admisible de acuerdo al criterio que se sigue. Se puede ver que la tendencia de la gráfica es ligeramente creciente, igual que para el caso real, y los errores por intervalo son muy pequeños.

Vehículos ligeros:



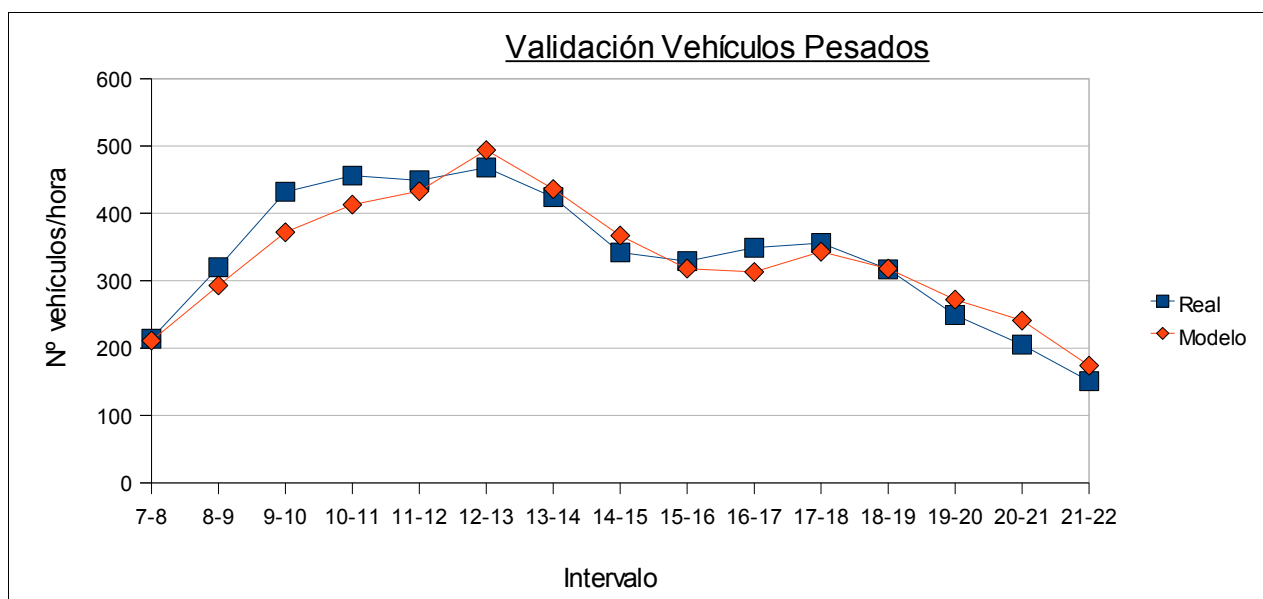
*Figura 7.1.4: Validación vehículos ligeros.*

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	TOTALES
Real	2236	3096	2781	2619	2566	2666	2734	2922	3067	3068	3077	3021	3247	3124	2873	42972
Modelo	2212	2793	2514	2330	2520	2740	2735	2823	2977	2900	2872	2829	3008	3008	3070	41331
Diferencia	-24	-303	-267	-289	-46	74	1	-99	-90	-168	-205	-192	-239	-116	197	-1641
Porcentaje	-1,07	-9,79	-9,6	-11,03	-1,79	2,78	0,04	-3,39	-2,93	-5,48	-6,66	-6,36	-7,36	-3,71	6,86	-3,82

*Tabla 7.1.3: Validación vehículos ligeros.*

En este caso, el error es mayor que para los autocares, aunque menor que para los taxis y, en cualquier caso, menor del 5%. Los errores para cada intervalo son muy pequeños, el valor más alto es de un 11%, pero es algo puntual, a efectos de validación el modelo es creíble.

Vehículos Pesados:



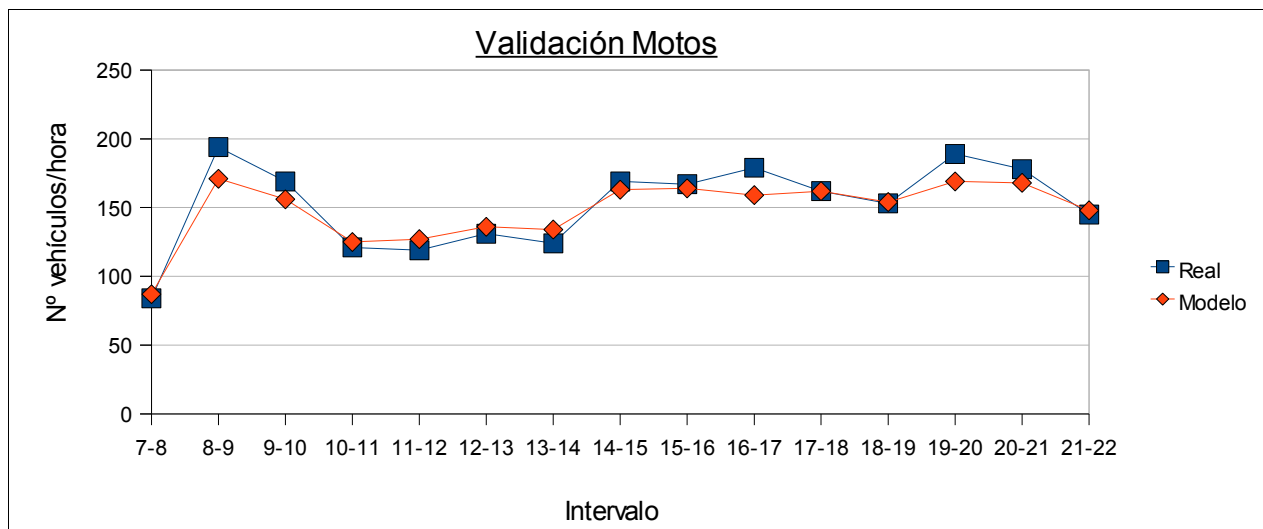
*Figura 7.1.5: Validación vehículos pesados.*

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	TOTAL
Real	214	320	432	456	449	468	424	342	329	349	356	317	249	205	151	5061
Modelo	211	293	372	413	433	494	436	367	318	313	343	318	272	241	174	4998
Diferencia	-3	-27	-60	-43	-16	26	12	25	-11	-36	-13	1	23	36	23	-63
Porcentaje	-1,4	-8,44	-13,89	-9,43	-3,56	5,56	2,83	7,31	-3,34	-10,32	-3,65	0,32	9,24	17,56	15,23	-1,24

*Tabla 7.1.4: Validación vehículos pesados.*

Los vehículos pesados tienen un error global de un 1,24% y su gráfica horaria se podría decir que está ligeramente desplazada hacia la derecha. Aún así, sigue la tendencia y cuenta con los máximos y mínimos de los datos reales.

Motos:



*Figura 7.1.6: Validación motocicletas.*

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	
Real	84	194	169	121	119	131	124	169	167	179	162	153	189	178	145	2384
Modelo	87	171	156	125	127	136	134	163	164	159	162	154	169	168	148	2223
Diferencia	3	-23	-13	4	8	5	10	-6	-3	-20	0	1	-20	-10	3	-161
Porcentaje	3,57	-11,86	-7,69	3,31	6,72	3,82	8,06	-3,55	-1,8	-11,17	0	0,65	-10,58	-5,62	2,07	-6,75

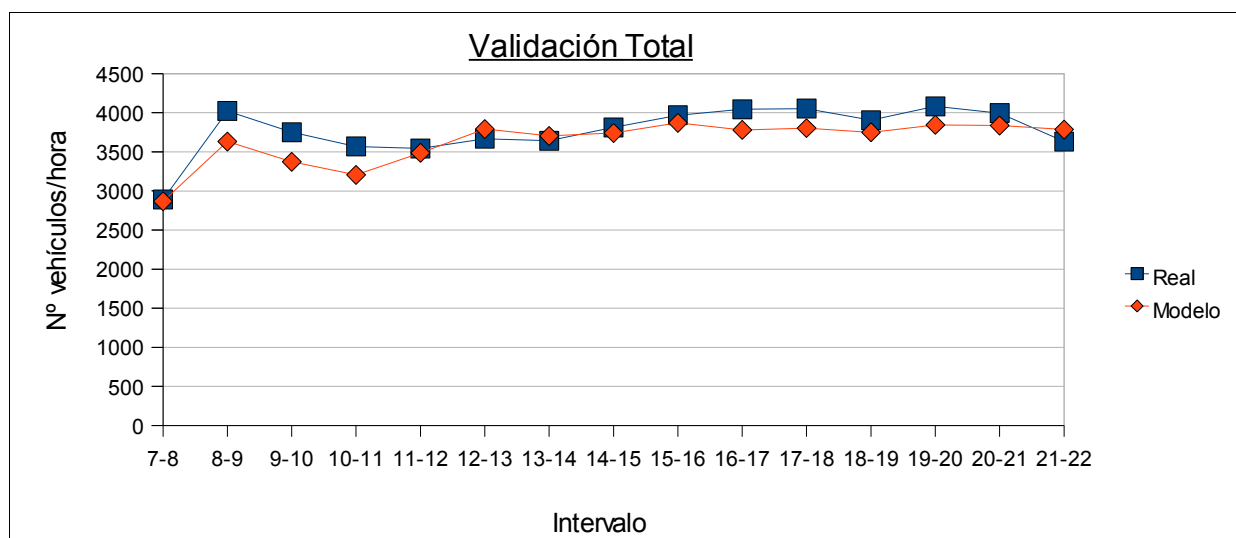
*Tabla 7.1.5: Validación motocicletas.*

El error de las motocicletas es ligeramente superior al 5%. Ésto es debido a ciertas características propias de estos vehículos, que no tienen el resto.

Dadas sus reducidas dimensiones, las motocicletas pueden ponerse en paralelo con los otros vehículos y adelantarlos. Éste efecto se ve maximizado durante los atascos y las paradas durante los semáforos. Simular este comportamiento en GETRAM no es posible, ya que todos los vehículos se mueven ordenadamente en línea sin poder ocupar más de un vehículo en paralelo por carril. Existen estudios en los que si la proporción de motocicletas resulta ser pequeña respecto al total de vehículos, como en este caso, no se considera relevante su influencia en la congestión del tráfico. [3]



Vehículos totales:



*Figura 7.1.7: Validación vehículos totales.*

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	TOTAL
Real	2891	4023	3751	3569	3543	3667	3642	3813	3968	4044	4054	3905	4083	3995	3632	56580
Modelo	2867	3632	3373	3205	3487	3793	3704	3741	3870	3781	3803	3750	3846	3836	3785	54473
Diferencia	24	391	378	364	56	-126	-62	72	98	263	251	155	237	159	-153	2107
Porcentaje	0,83	9,72	10,08	10,2	1,58	-3,44	-1,7	1,89	2,47	6,5	6,19	3,97	5,8	3,98	-4,21	3,72

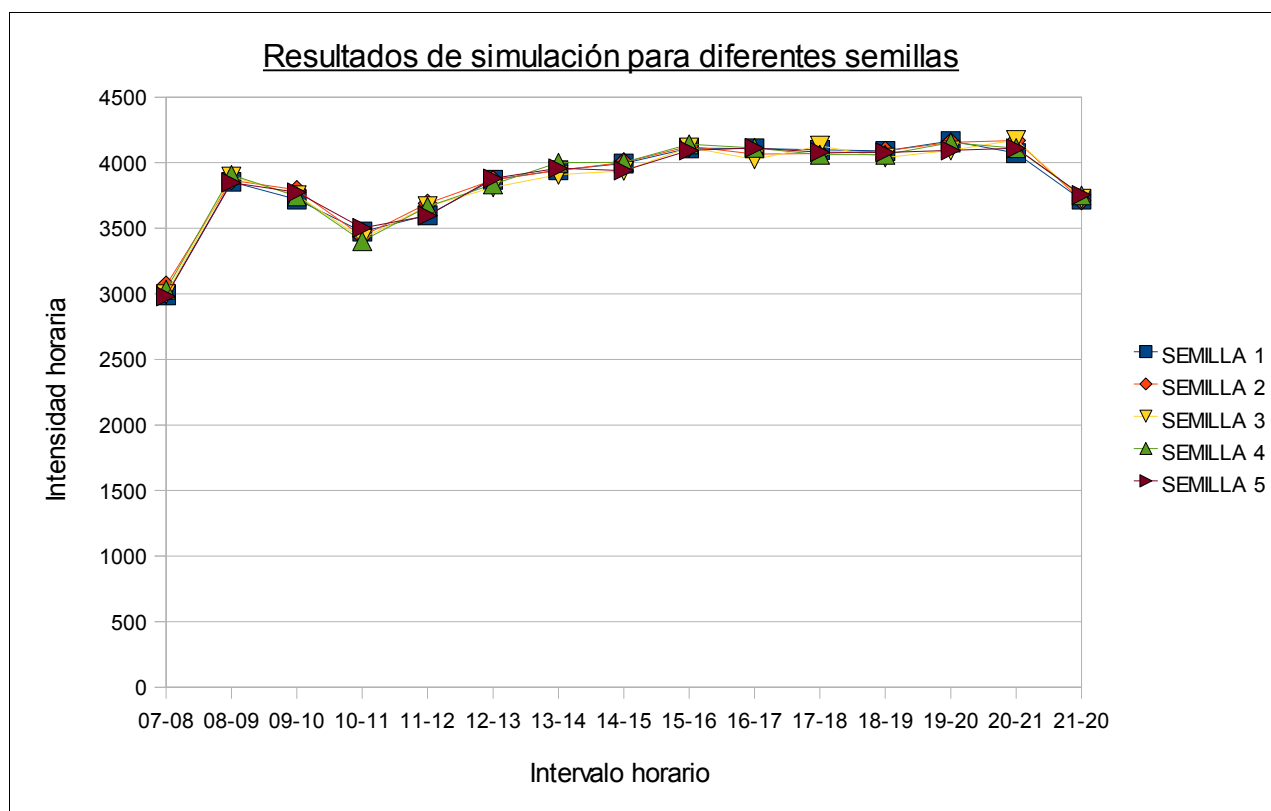
*Tabla 7.1.6: Validación vehículos totales.*

Para el total de los vehículos, el error total es menor del 5%, lo que implica que el modelo se encuentra dentro de los límites para ser considerado válido. Los errores por intervalo son todos menores del 6,5%, a excepción de los valores del intervalo de 8 a 11 de la mañana. La razón más influyente, que se explicará con mas detalle en el apartado de “Resultados de Tráfico”, es que existe un pico de afluencia de coches de 8 a 9 de la mañana, que provoca, que algunas entradas a la glorieta se saturan. El error porcentual entre sistema real y el modelo, es de 3,72 % para el total de los vehículos y de un 3,82 % para los vehículos ligeros. Estos 2 errores son muy similares y refuerza la hipótesis de que la influencia de los vehículos ligeros en el tráfico de esta red es mu superior al del resto de vehículos.

### 7.1.1.1 Semillas.

Para demostrar con certeza que los resultados obtenidos no han sido fruto de la casualidad, se debe simular el modelo a partir de diferentes semillas y contrastar que los resultados son parecidos.

Las semillas son números enteros que utilizan los simuladores informáticos como números aleatorios, como por ejemplo, la llegada inicial de vehículos. Estos números permiten que dos simulaciones no sean exactamente iguales si se parten de dos semillas diferentes. Las semillas en el programa GETRAM pueden asignarse o bien de manera automática por el propio simulador, o de manera manual por el usuario. En la figura 7.1.8. se muestran los resultados de la simulación a partir de 5 semillas distintas.



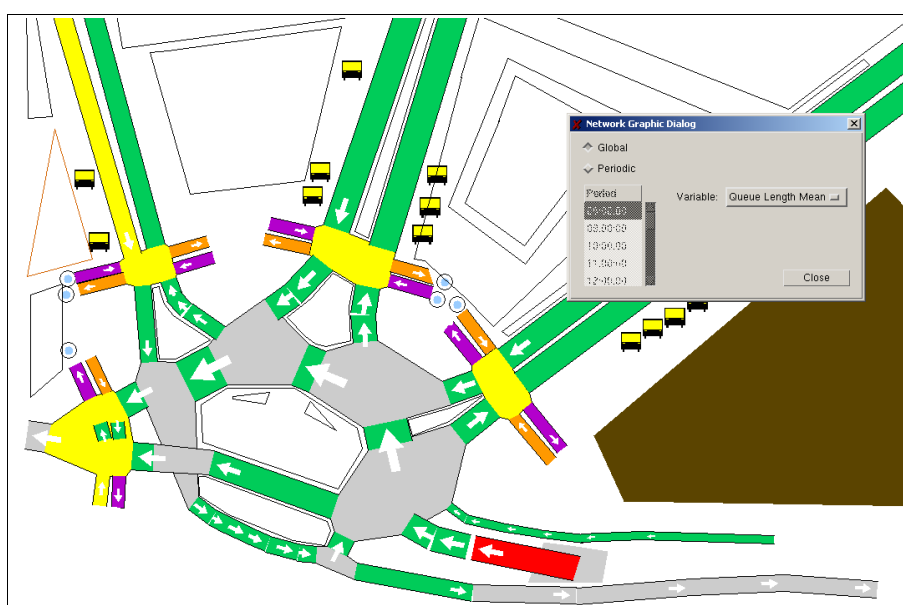
*Figura 7.1.8: Resultados de la simulación a partir de diferentes semillas.*

Como puede verse, las cinco simulaciones han tenido resultados muy parecidos. Por tanto puede considerarse que los resultados de la simulación son independientes de la semilla utilizada.

## 7.2. RESULTADOS DEL MODELO: COMPORTAMIENTO DEL TRÁFICO

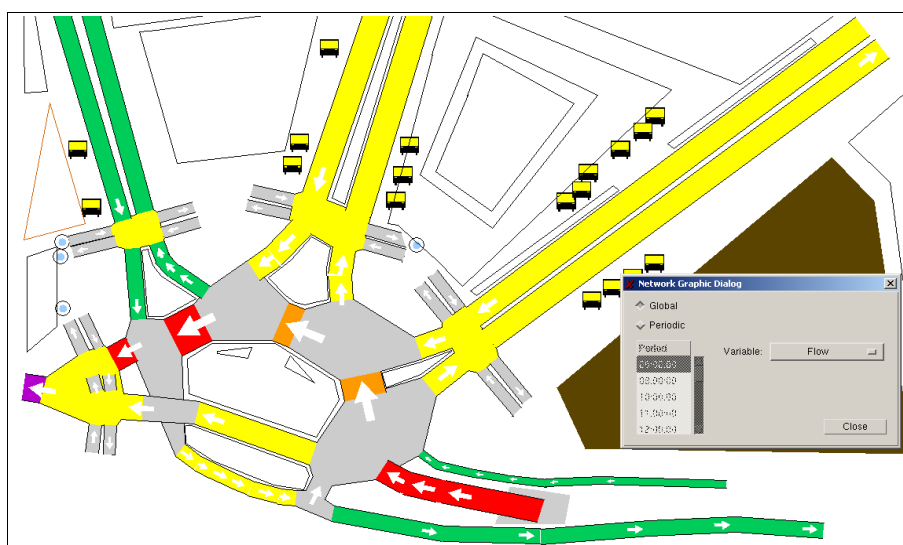
Los resultados de la validación permiten considerar el modelo válido, por lo que a continuación se va a estudiar el comportamiento del tráfico en la zona a partir de él. Estudiando a fondo los datos obtenidos, puede verse que existen importantes problemas de fluidez en la zona.

En las figuras 7.2.1 y 7.2.2 se puede ver de manera global y gráfica las secciones más problemáticas.



*Figura 7.2.1: Cola media en las secciones de la glorieta modelada.*

La cola media hace referencia a la cantidad media de coches que se quedan parados en una sección. Si este valor es alto, la sección aparece coloreada de rojo, lo que indica que se forman grandes colas, provocando que se formen atascos. Se puede ver que la entrada por la M30 presenta problemas, efecto que también se podía observar en la realidad.



*Figura 7.2.2: Intensidad media en las secciones de la glorieta modelada.*

La intensidad media indica cuáles son las vía más y menos transitadas. El que la intensidad sea alta o baja no es un indicativo de que se produzcan atascos, mientras la capacidad de la vía sea suficiente como para permitir ese flujo de vehículos no habrá problemas.

El mayor atasco se da en la sección que modela la entrada por la M30. Ya se vio, desde el apartado de “Giros permitidos”, que este cruce presentaba ciertos problemas inducidos por los vehículos que provenían del paseo de las Yaserías. Numéricamente, se va a analizar este problema con más detalle para intentar buscar una solución alternativa.

Se han agrupado los datos numéricos de la simulación por la intensidad total del día, por el total de vehículos y por la sección de entrada. Éstos datos se presentan en las siguientes tablas.

Acceso	Nº vehículos realidad	Nº vehículos modelo	Diferencia	Porcentaje
M30	27254	24744	-2510	-9,21
Calle Yaserías	4947	5069	122	2,47
Pº Acacias	9226	9269	43	0,47
Calle Toledo	5458	5780	322	5,9
Pº Imperial	9695	9611	-84	-0,87
TOTAL	50688	54473	-2107	-3,72

*Tabla 7.2.1: Resultados de aforos en los accesos.*

### *Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.*

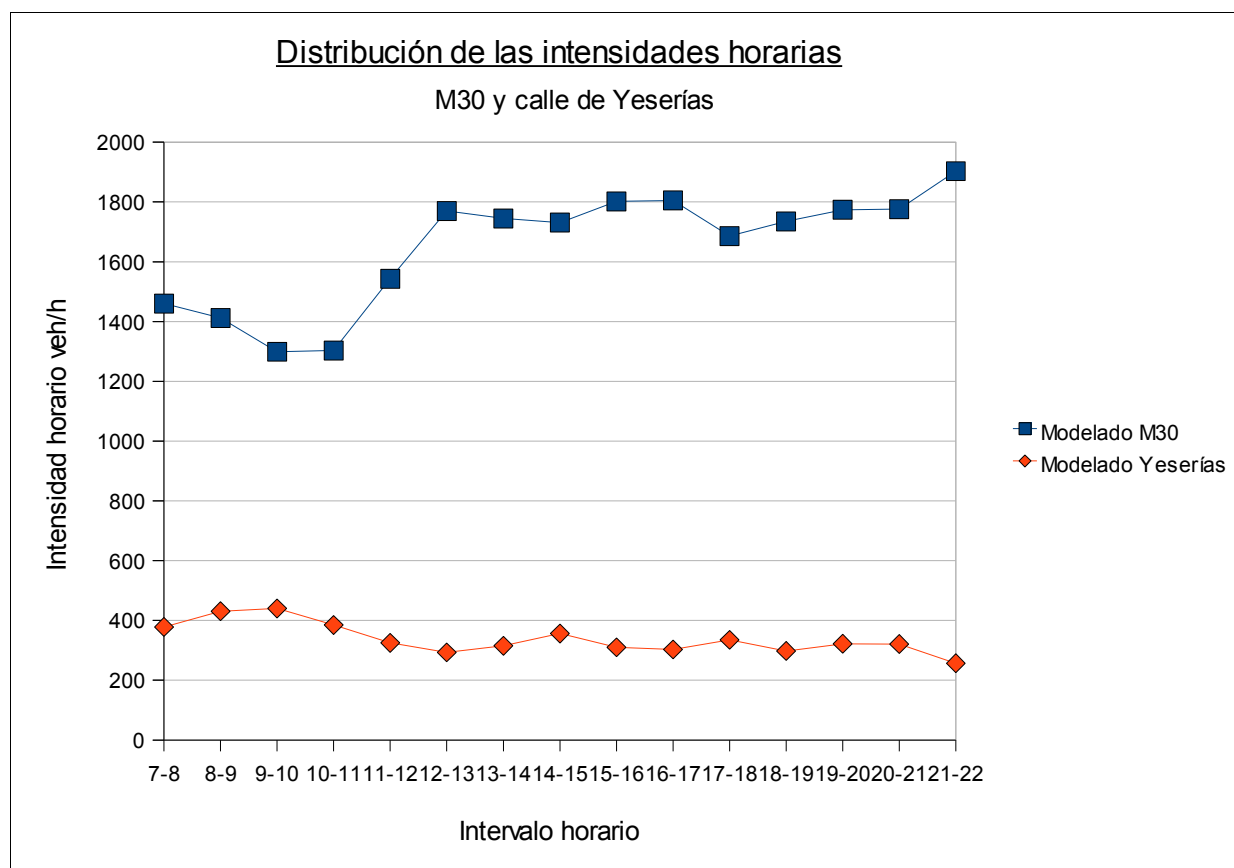
De esta tabla, se pueden obtener datos que ofrecen información trascendente. Por un lado las desviaciones porcentuales de vehículos que entran por cada una de estas secciones respecto del modelo, son muy pequeñas frente a la realidad, excepto la entrada por la M30.

En el caso del paseo de las Yaserías, el paseo de las Acacias y la calle de Toledo estas diferencias son positivas. Esto quiere decir que el modelo no se encuentra saturado y, por lo tanto, estas vías podrían admitir un mayor número de vehículos. Éstos son datos globales, lo cual no quiere decir que para ciertas horas estas tres vías no se encuentren en su capacidad máxima.

Por otro lado, se ve el problema que ya se había detectado en el análisis gráfico de las figuras 7.2.1. y 7.2.2. La entrada por la M30 se encuentra saturada y casi cuenta con una desviación del 10% respecto de la realidad, aún así permite el paso de 24.000 vehículos diarios. Durante la simulación, aparece un mensaje con el siguiente contenido:

Entrance Virtual Queue in section 6 is becoming bigger than 500 vehicles.

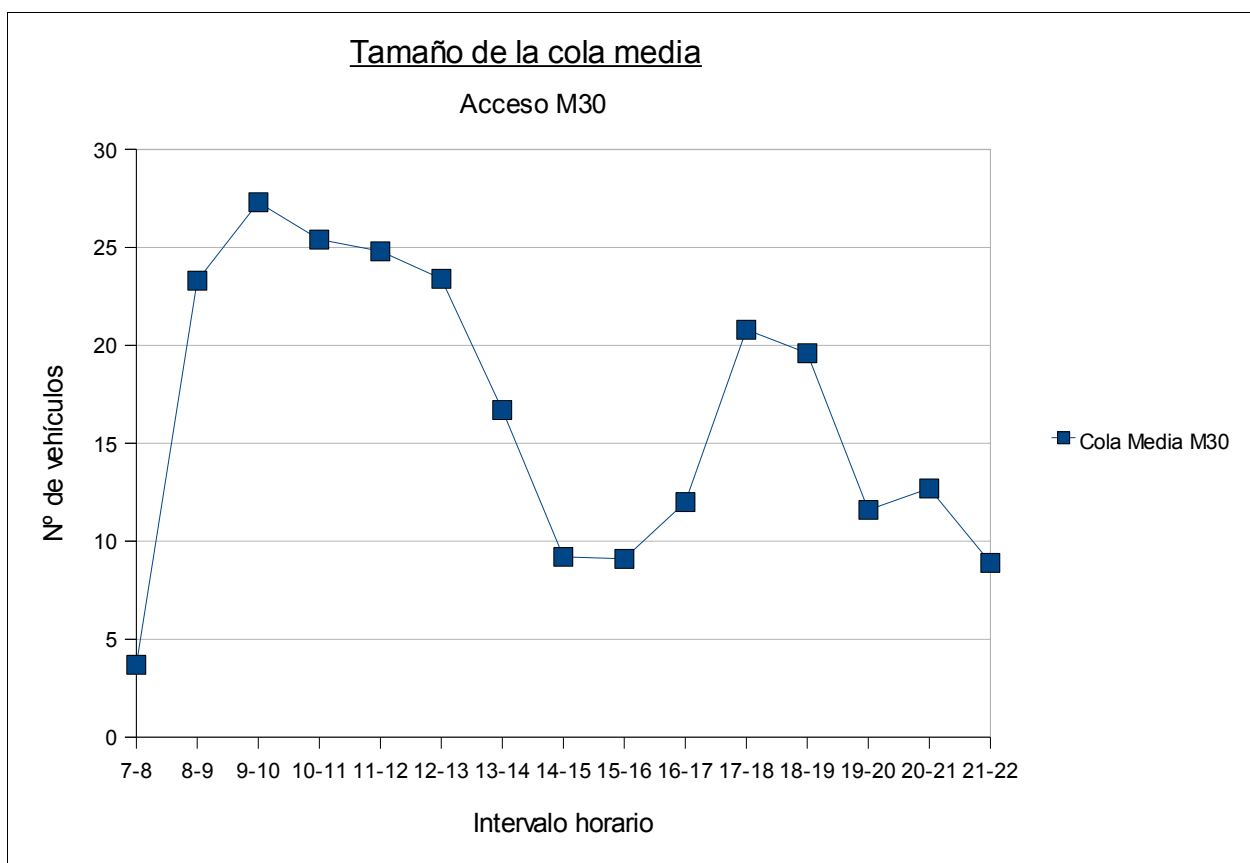
Con este aviso AIMSUN advierte que se está generando una cola de más de 500 vehículos en la *section 6*, que corresponde a la entrada por la M30. Los vehículos que vienen por el acceso del paseo de las Yaserías, obstruyen el paso a los vehículos provenientes de la M30. En la figura 7.2.3. se muestran las gráficas de la distribución de intensidades horarias, pertenecientes a los accesos por la M30 y el paseo de las Yaserías.



*Figura 7.2.3: Intensidades horarias en la calle M30 y en el paseo de las Yaserías.*

Estas dos gráficas representan datos interesantes. La curva superior representa la intensidad en la sección de la M30. El que aparezca un mínimo en esta curva en el intervalo de 9 a 10 de la mañana no es porque circulen pocos vehículos, sino porque coincide con el máximo de las intensidades del paseo de las Yaserías. Los vehículos de esta calle impiden e interrumpen el paso de los vehículos procedentes de la M30, a los que les obligan a parar formando grandes colas sin poder avanzar con la fluidez que deberían.

En los resultados gráficos se mostraron dos parámetros que se consideraron importantes: el flujo de vehículos, para localizar las secciones con mayor tráfico, y la cola media. Este último parámetro es utilizado para medir cuantitativamente dónde se encuentran los mayores atascos y un valor medio del tamaño de sus colas. En el análisis gráfico, se vio que el acceso por la M30 presentaba los mayores problemas. En la figura 7.2.4. se muestra la curva obtenida de los datos referentes a la cola media de esta sección intervalo a intervalo horario.



*Figura 7.2.4: Valor de la cola media en el acceso por la M30.*

Los máximos y mínimos de esta curva coinciden con los puntos máximos y mínimos del flujo de vehículos. A pesar de esto, su forma general es muy diferente. Es importante valorar esta curva en su justa medida, ya que su influencia en los parámetros ambientales será decisiva. Por su posible uso más adelante, los valores de la cola media de ésta sección son los que aparecen en la tabla 7.2.5.

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22
Cola Media M30	3,7	23,3	27,3	25,4	24,8	23,4	16,7	9,2	9,1	12	20,8	19,6	11,6	12,7	8,9

*Figura 7.2.5: Valor numérico de la cola media en el acceso por la M30.*

Estos valores servirán de referencia a la hora de determinar si la alternativa propuesta para mejorar el tráfico es válida y en que medida.

## 7.3. RESULTADOS DEL MODELO: ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES.

### 7.3.1. Consumo de combustible.

El estudio ambiental presenta algunas diferencias y complicaciones que requieren un tratamiento diferente.

- Para el cálculo de emisiones, la herramienta GETRAM, necesita datos muy concretos para cada tipo de vehículo. En el estudio de gasto de combustible, todos los vehículos se tuvieron en cuenta. Para las emisiones de contaminantes, CO, NOx y HC, no se tuvo en cuenta a las motocicletas.
- El gasto y la emisión de contaminantes es dependiente de dos factores: el tipo de vehículo y su estado en la red:
  1. Para el análisis de tráfico, los vehículos ligeros eran el elemento más influyente. Para el estudio ambiental, los vehículos pesados, autocares y autobuses, ganan en importancia al tener unas emisiones y un gasto muy superior.
  2. Los estados de parada, que no influyen en un aumento de la intensidad, sino que la disminuyen, hacen que la cantidad de combustible usado y contaminantes emitidos se dispare. Los estados de aceleración, también provocan grandes gastos de combustible sin necesidad de influir positivamente al tránsito vehicular.
- Es muy importante determinar sobre qué secciones se va a llevar a cabo el estudio y sus dimensiones. La dimensión de las vías es un parámetro importante, que en este caso hay que utilizar con cuidado. Por ejemplo, una vía recta de 100 metros que registre una intensidad de 100 veh/h, mantendrá la misma intensidad que otra vía de 200 metros con los mismos parámetros de densidad y velocidad. Sin embargo, generalmente el gasto será el doble ya que los vehículos deben recorrer el doble de recorrido.

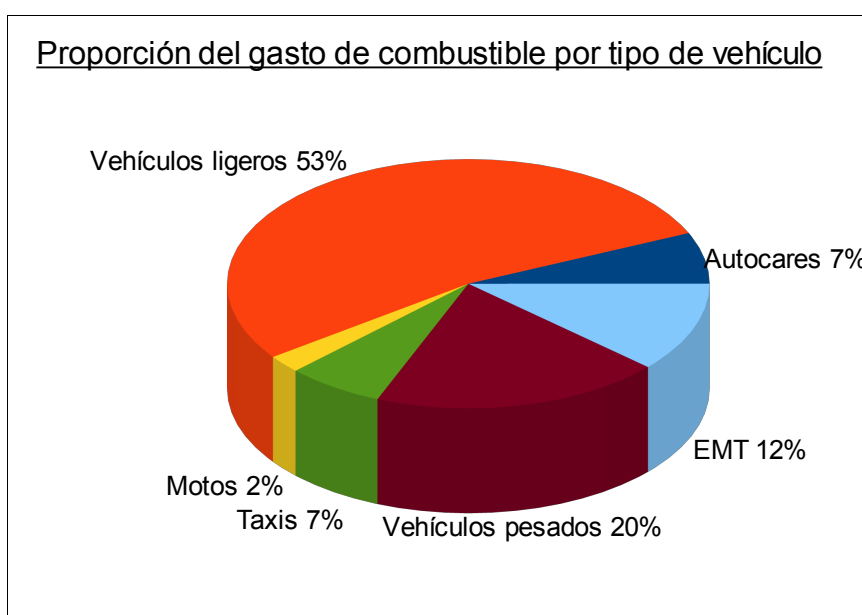
Los resultados obtenidos del gasto de combustible para la glorieta completa son los que aparecen en la tabla 7.3.1.

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	TOTAL
Fuel TOTAL (l)	246	510,5	553,6	529,4	552,6	583,8	491,1	368,6	377,6	429,2	494,4	536	471,8	377,7	314,5	6836,8

*Tabla 7.3.1: Valor del gasto de combustible en la glorieta completa.*



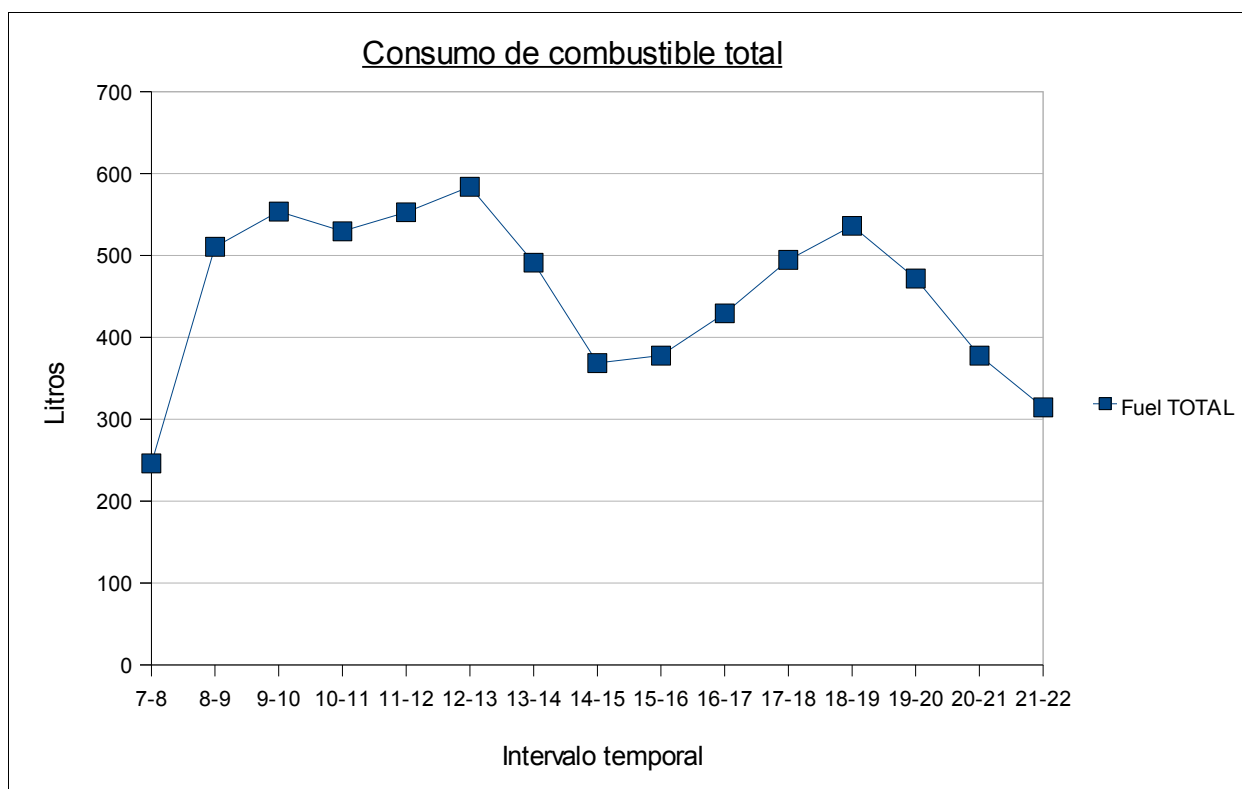
El viaje de todos los vehículos a través de la glorieta de estudio provoca que se gasten 6836,8 litros de combustible durante las 15 horas simuladas. Con el número de litros consumidos y la cantidad total de kilómetros que recorren el conjunto de todos los vehículos, que son 22931,7 km, se puede obtener el consumo medio por cada 100 km, que en este caso es de 29,81 l/100km. Si todo el tráfico fuera de vehículos ligeros este gasto parecería exagerado. Sin embargo, no hay que olvidar que en esta red hay vehículos pesados y autobuses con muchas paradas que superan los 40 l/100km. Ésta es la razón por la que los vehículos pesados y autobuses tienen un efecto mayor que en el análisis exclusivo del tráfico. Las proporciones de gasto de combustible, por tipo de vehículo, son las que aparecen en la figura 7.3.1.



*Figura 7.3.1: Gasto proporcional de combustible..*

Era evidente que en valor absoluto, los vehículos ligeros provocarían el mayor gasto por ser los más numerosos, su consumo es de alrededor del 50% sobre el total. Sin embargo, es muy inferior a su valor porcentual en la composición del tráfico, que era de casi un 74%. Tanto los vehículos pesados, como autobuses y autocares, consumen más de lo que les correspondería porcentualmente de acuerdo con la composición del tráfico. También se puede ver que la influencia de las motocicletas es ligeramente superior al 2%, a pesar de que suponían un 4,5% del total de los vehículos.

En la figura anterior ha quedado demostrado que algunos tipos de vehículos consumen mucho más que otros. Para demostrar que el gasto de combustible también es dependiente del estado en que se encuentren los vehículos se analizará el gasto para cada intervalo horario. En la figura 7.3.2. se representan los datos del gasto de combustible para cada hora desde las 7 de la mañana hasta las 10 de la noche.



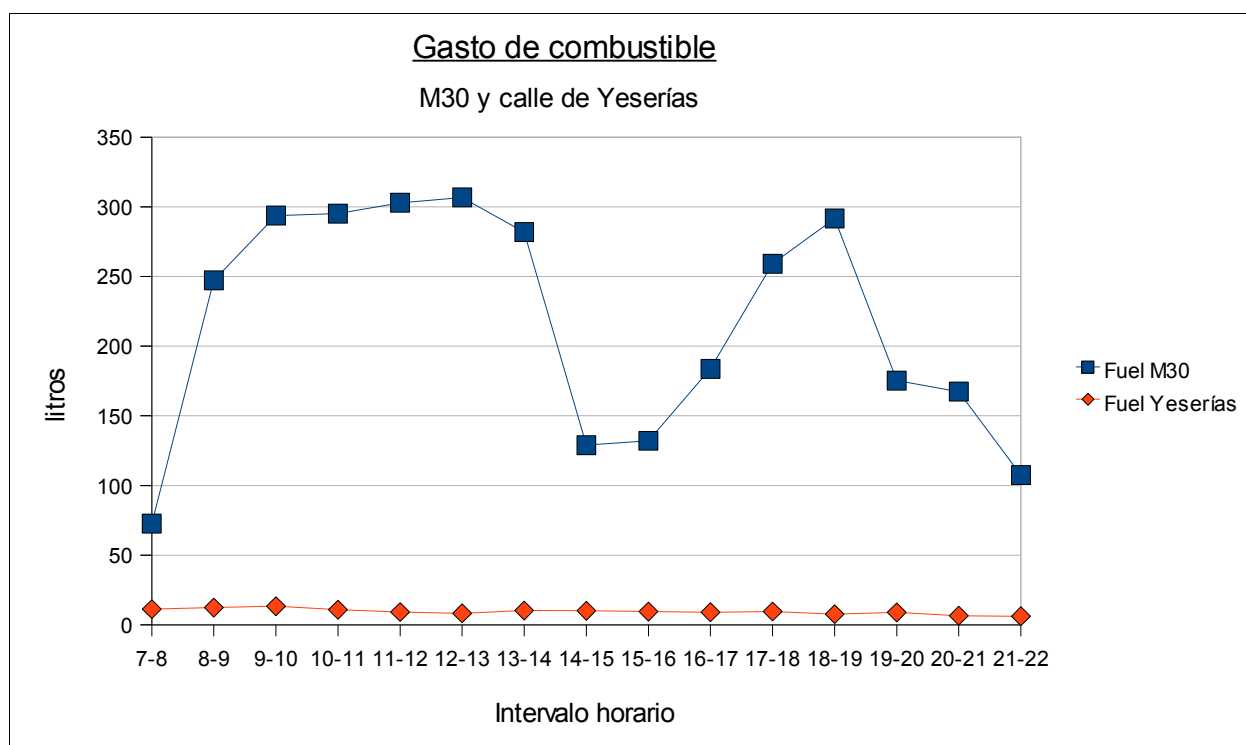
*Figura 7.3.2: Consumo de combustible total.*

Se pueden apreciar varias diferencias respecto a la gráfica que representaba las intensidades horarias. Esta gráfica comenzaba con una subida desde las 7 hasta las 9 de la mañana, momento a partir del cual comenzaba a disminuir hasta volver a subir en torno a las 2 de la tarde. La gráfica de consumo, por el contrario, no disminuye a partir de las 9 de la mañana, sino que continúa creciendo ligeramente y es a las 2 de la tarde cuando decrece de manera notable. Este hecho refuerza la idea de que el gasto de combustible no es únicamente proporcional con el aforo de vehículos.

Para los análisis futuros resulta útil analizar los datos de los accesos por la M30 y por el paseo de las Yaserías a la red. En la siguiente tabla se muestra los datos numéricos y a continuación, en la figura 7.3.3, su representación gráfica.

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	TOTAL
Fuel M30	72,7	247,2	293,7	295,1	302,9	306,7	281,8	129	132,1	183,7	259,2	291,6	175,3	167,4	107,6	3246
Fuel Yaserías	11,3	12,4	13,4	10,9	9,2	8,3	10,3	10,1	9,5	9,06	9,6	7,7	9	6,6	6,2	143,56

*Tabla 7.3.2: Valores de consumo de combustible en la calle M30 y en el paseo de las Yaserías.*



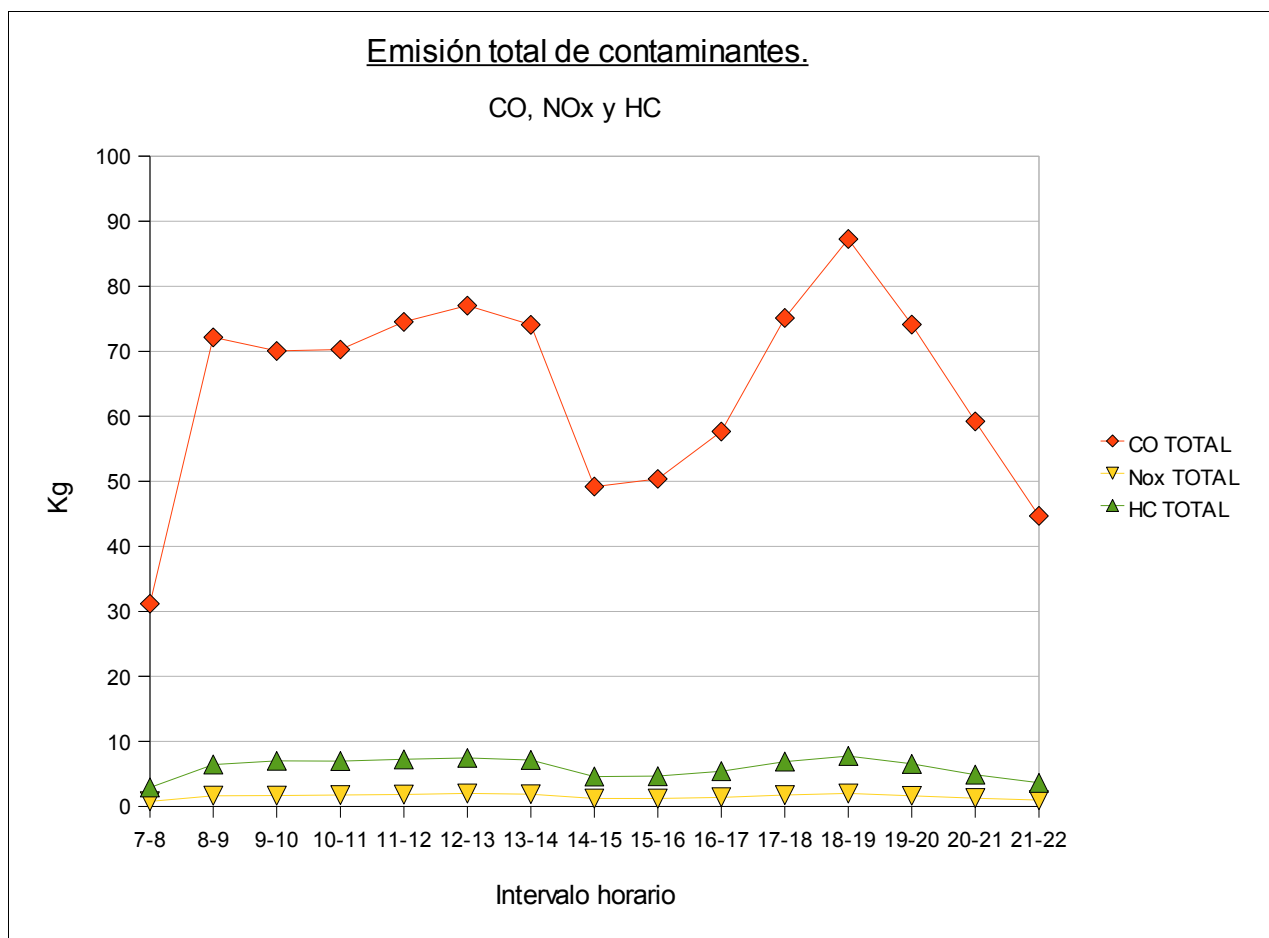
*Figura 7.3.3: Valores de consumo de combustible M30 y paseo de las Yaserías.*

Comparando ésta gráfica con la que representa la intensidad de vehículos, se ve que el gasto en el paseo de las Yaserías tiene consonancia con el flujo de vehículos. Sin embargo, si se recuerda, la intensidad horaria no presentaba un crecimiento tan exagerado entre las 8 y las 9 de la mañana, ni por supuesto se mantenía en niveles altos, como ocurre en este caso, entre las 9 de la mañana y las 2 de la tarde. El segundo máximo de ésta curva si coincide con el alto flujo de vehículos que se da entre las 6 y las horas de la tarde.

Si por el contrario, se compara esta gráfica con la figura 7.2.4, que representaba el valor de la cola media para cada intervalo horario. Su parecido es casi idéntico. La razón de este parecido es que cuanto mayor es la cola media, mayor número de vehículos se encuentran parados. Estos vehículos, con la tecnología que existe a día de hoy, se encuentran consumiendo combustible en un estado que se conoce como de ralentí, para evitar que el motor se pare y no haya que volver a arrancarlo. Sin embargo, esta comodidad para el conductor, durante los atascos, se convierte en una catástrofe medioambiental que consume combustible y emite contaminantes sin mover el vehículo.

## 7.3.2. Emisión de contaminantes.

Una vez presentados los datos referentes al gasto de combustible, se va proceder a presentar los referentes a la emisión de contaminantes. En la Figura 7.3.4. se muestra gráficamente la evolución de los tres contaminantes estudiados a lo largo del tiempo de simulación.



*Figura 7.3.4: Emisión de contaminantes por el total de los vehículos.*

En una primera valoración se puede ver que la cantidad de CO es muy superior a la de los otros dos contaminantes. En el caso del CO, sigue la tendencia de la curva de gasto de combustible total aunque con las pendientes más pronunciadas. Además, refleja valores máximos y mínimos proporcionalmente más extremos.

### Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.

En las figuras 7.3.5 y 7.3.6 se representan las gráficas de los contaminantes, NOx y HC, con una escala más pequeña para que se puedan apreciar por separado.

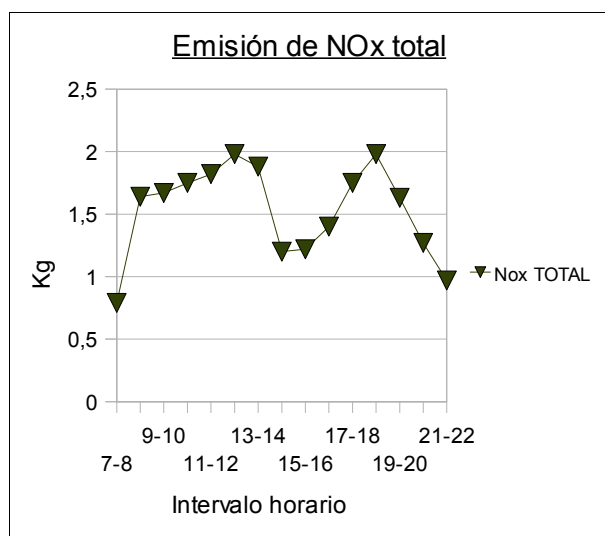


Figura 7.3.5: Emisión total de NOx.

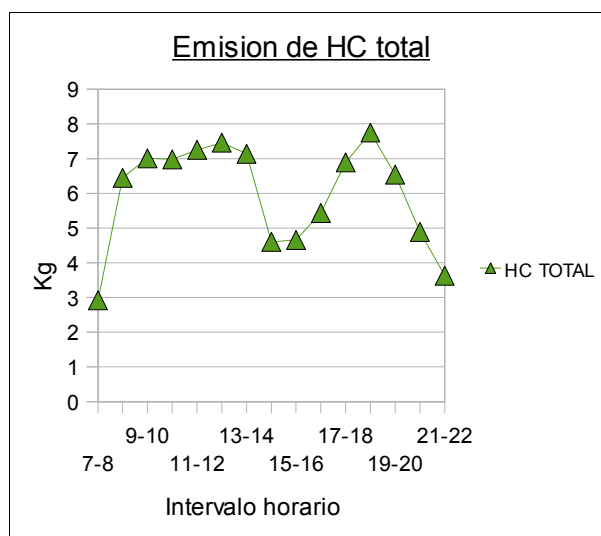


Figura 7.3.6: Emisión total de HC.

Ambas curvas siguen tendencias muy similares, al igual que el CO y el gasto de combustible, aunque con valores claramente menores. Como ya se comentó en el gasto de combustible, todas estas gráficas se encuentran relacionadas con los atascos, las colas y el hecho de que los vehículos se encuentren parados pero con el motor en marcha.

Los datos numéricos de estos tres contaminantes se resumen en la tabla 7.3.3.

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	TOTAL
CO TOTAL (Kg)	31,17	72,15	70,06	70,27	74,53	77,03	74,07	49,2	50,37	57,66	75,12	87,27	74,12	59,22	44,69	966,59
Nox TOTAL (Kg)	0,79	1,64	1,67	1,75	1,82	1,98	1,88	1,2	1,22	1,4	1,75	1,98	1,63	1,27	0,97	22,96
HC TOTAL (Kg)	2,92	6,45	7,01	6,98	7,25	7,46	7,14	4,6	4,66	5,43	6,89	7,75	6,54	4,89	3,63	89,65

Tabla 7.3.3: Resultados numéricos de la emisión de contaminantes.

La emisión de CO, es del orden de 10 veces superior a la emisión de HC y del orden de 35 veces superior a la de NOx. Resulta complicado analizar de manera objetiva su impacto en la zona ya que sería necesario un estudio exhaustivo de las condiciones climáticas de la zona, aspectos topográficos y urbanísticos, la presencia de otras fuentes de contaminantes, como viviendas o industrias... Datos que se escapan del objetivo de este proyecto.

A pesar de ello, se utilizarán más adelante estos datos para, de manera cualitativa, valorar si en la alternativa propuesta estos niveles de emisión aumentan, disminuyen o se mantienen.

## **8. ALTERNATIVAS.**

A la vista de los resultados obtenidos en este capítulo se van a proponer dos alternativas para mejorar tanto el tráfico en la zona, como la disminución del consumo de carburante y emisión de contaminantes. Una de las alternativas se va a basar únicamente en la mejora de los ciclos semafóricos, y una segunda que será analizada con más detalle por ser ésta la que el Excelentísimo Ayuntamiento de Madrid ha llevado a cabo.

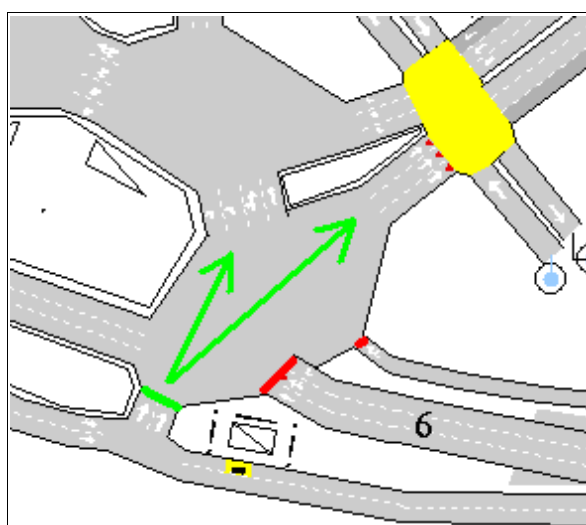
En el capítulo anterior se vio que el mayor problema de la glorieta de las Pirámides era su entrada por la M30. Recordando la historia de esta glorieta y de esta entrada en concreto, nos encontramos con que esta entrada fue construida debido al soterramiento de la M30 madrileña. La entrada anterior no provenía de un túnel, si no que compartía acceso con el paseo de las Yaserías ocupando dos carriles en total.

No parece algo lógico que ahora que existen cuatro carriles para el mismo acceso existan problemas que antes no había. La explicación reside en el hecho de que antes el acceso era conjunto por las dos entradas, M30 y paseo de las Yaserías, y los conductores podían situarse en el carril adecuado para su camino **antes de** llegar al cruce de la glorieta. En el caso de estudio, al ser el acceso dividido pero gobernado por la misma señal semafórica, los vehículos que quieren entran por el acceso de la M30 y desean girar a la derecha, se cruzan inevitablemente con los vehículos de el paseo de las Yaserías. De igual modo, los vehículos que entran por el paseo de las Yaserías y quieren salir por la calle de Alejandro Dumas, que además son la mayoría, se cruzan con los provenientes de la M30.

### Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.

Esta situación provoca que la circulación sea intermitente. Lo es, especialmente, para los vehículos de la M30 ya que el paseo de las Yaserías queda a su derecha y por tanto, tiene preferencia. Recordando los datos de los aforos, el número de vehículos que vienen por la M30 es casi seis veces mayor que los que aparecen por el paseo de las Yaserías. Así pues, un número en proporción pequeño, impide la entrada por el acceso más importante.

La primera alternativa que se valoró consistía en un cambio de los ciclos semafóricos. Si se permitía la entrada a la glorieta en tiempos distintos no habría problemas de cruces entre vehículos dentro de la intersección. Esta idea tiene algunos problemas. Para empezar, los tiempos por fase van muy ajustados y permiten poco margen de maniobra. Esto ocurre porque el tiempo en que el semáforo se encuentra en rojo para los vehículos de la M30 y el paseo de las Yaserías, se encuentra en verde para los peatones y para los vehículos que cruzan desde el paseo de los Pinos (Figura 8.1).



*Figura 8.1: Salida por el paseo de los Pinos hacia la Intersección 1.*

Por esta razón, no era posible acortar el tiempo de rojo. Lo que sí se podía hacer era separar la señal de entrada por el paseo de las Yaserías de la M30 para que no fueran simultáneas. La idea se probó aplicando el siguiente diagrama de fases:

Ciclo inicial	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
M30 y Yaserías	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Pº de los Pinos	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Ciclo alternativo	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
M30	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Yaserías	Rojo	Rojo	Rojo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Pº de los Pinos	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo	Rojo	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

*Tabla 8.1: Comparación ciclos de semáforo inicial frente a la primera alternativa.*



### *Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.*

Como se puede ver, las fases de el paseo de las Yaserías están completamente separadas de las de la M30 para evitar que coincidan en el tiempo. A la M30 se le dio más tiempo de ciclo verde, ya que su flujo de coches es superior y es necesario para evitar colas.

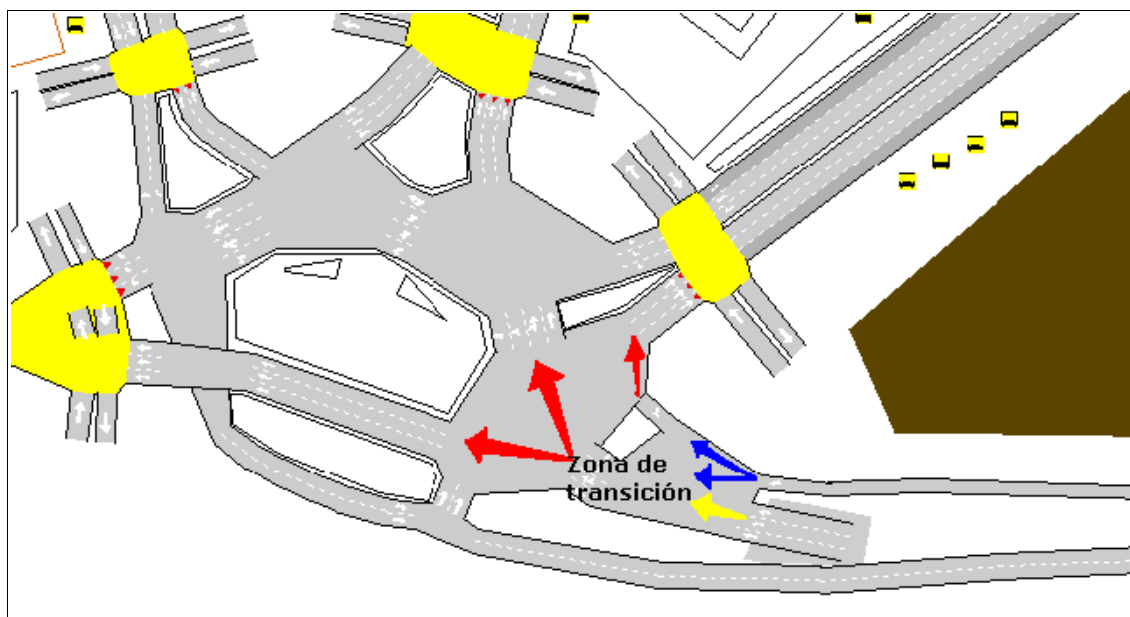
El resultado fue más satisfactorio que el del estado inicial. Aún así, no resolvía completamente el problema. Se evitaba que los vehículos girasen y se cruzasen unos con otros, consiguiendo que mientras su semáforo se encontrase en verde, el tráfico fuera fluido y constante. El problema es que el tiempo por ciclo de luz verde era menor, en este caso, que en el inicial ya que se tenía que repartir entre dos accesos lo que antes era un sólo ciclo conjunto.

El Excelentísimo Ayuntamiento de Madrid optó por otra alternativa más eficiente y no mucho más cara económicamente. Se podría resumir las ideas clave del problema de esta forma:

- Es de vital interés que los vehículos del paseo de las Yaserías no interfieran con los vehículos de la M30 mientras éstos estén moviéndose.
- El tiempo de ciclo verde es de 80 segundos para las dos calles, M30 y Yaserías, y no puede alargarse más.
- Por el acceso de la M30 circulan muchos más vehículos y es a estos vehículos a los que habría que favorecer con la reforma.

La alternativa consiste en crear una zona de transición donde los vehículos del paseo de las Yaserías se van almacenando, de manera que ya no interfieren con los de la M30. Esto es debido a que los conductores se posicionan en los carriles antes de realizar el giro. Por otro lado, el paso permitido por los vehículos de la zona de transición hacia la glorieta, y los procedentes de la M30, es el mismo y consta de 80 segundos, por lo que se maximiza este valor.

Los perjudicados son los vehículos del paseo de las Yaserías cuyo tiempo permitido en dirección hacia la *zona de transición* no es de 80 segundos si no de casi 30, que en cualquier caso es más tiempo que en la alternativa anterior. De cualquier forma, ese no es el factor limitante. Realmente, lo que limita el buen rendimiento de este carril es que la zona de transición tiene una capacidad limitada, y para momentos de mucho tráfico se satura. Puede verse esta mejora de manera gráfica en la figura 8.2.



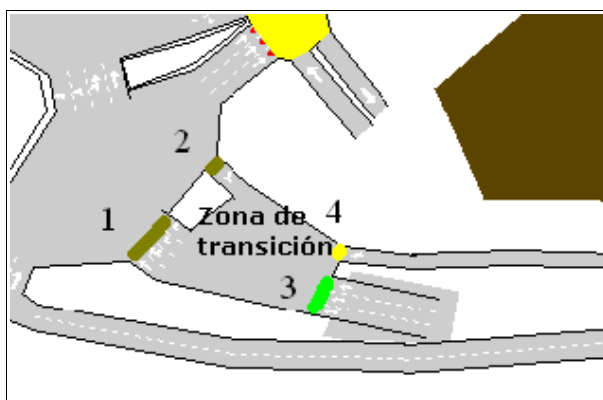
*Figura 8.2: Glorieta reformada.*

En esta imagen se puede ver la reforma de la glorieta con sus giros permitidos por carril, y la localización de la zona de transición. En amarillo está dibujado el giro permitido para los vehículos del acceso por la M30, que sólo pueden seguir recto atravesando la zona de transición. En azul los vehículos del paseo de las Yaserías tienen dos alternativas:

1. Entrar a la zona de transición si su camino es atravesar la glorieta, pudiéndose colocar en los carriles más convenientes para ello (los dos más a la derecha si fueran hacia la calle de Toledo, el paseo Imperial o el paseo de los Pinos; los tres de más a la izquierda si continuasen recto y salieran por el la calle de Alejandro Dumas).
2. El otro giro permitido les deja continuar por el tramo final del paseo de las Yaserías, aunque sólo para aquellos vehículos que quisieran ir hacia el paseo de las Acacias. La idea de este carril es quitar vehículos de la zona de transición e intentar que no llegue a su capacidad máxima.

La obra necesaria para esta alternativa, es poco más que colocar dos nuevos semáforos y volver a pintar las señales viales de la calzada. Además, se puede ver que la zona de transición posee cuatro carriles en lugar de los tres que tenía antes. La razón de ambas cosas es que la separación de los vehículos del paseo de las Yaserías y de la M30, estaba marcada por un cebreado y unos bolardos de plástico. Al quitar estos bolardos se añade un tramo de calzada que, debidamente señalizada, se ha convertido en un carril más pasando de tres a cuatro.

En la figura 8.3. puede verse la situación de los semáforos para este nuevo cruce:



*Figura 8.3: Ubicación de los semáforos en la reforma.*

En la situación inicial ya existían los semáforos marcados con los números 1 y 2. Se han tenido que añadir los dos semáforos, antes comentados, marcados con los números 3 y 4. Los semáforos 1 y 2 llevan el ciclo semafórico del estado inicial, y los semáforos 3 y 4 llevan ciclos inversos, es decir, cuando el 3 está en verde el 4 en rojo y viceversa. Los ciclos semafóricos de estos cuatro semáforos son los que aparecen en la tabla 8.2.

Ciclo reforma	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	110
1 y 2	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
3	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde
Pº de los Pinos y 4	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde	Verde

*Tabla 8.2: Ciclo semafórico de la reforma.*

Como se puede ver, el ciclo del semáforo 3 es igual que el de los semáforos 1 y 2, con un tiempo de verde de 80 segundos. En el periodo en que estos semáforos se encuentran en rojo, sin posibilidad de paso, es cuando pasa a verde el semáforo 4, permitiendo que los coches del paseo de las Yaserías pasen a la zona de transición. Cuando este semáforo vuelve a pasar a rojo, los otros pasan a verde con lo que no interfieren coches entre sí, ya que no existe ningún momento en que se encuentren simultáneamente en verde el semáforo de la M30 y el paseo de las Yaserías.

Podría pensarse que el hecho de que se amontonen coches en la zona de transición, puede repercutir negativamente en los vehículos que salen de la M30, y es cierto. Aunque el tiempo de paso permitido es de 80 segundos si existieran muchos vehículos en la zona de transición, al abrirse el semáforo 3 de manera simultánea con el 1, los coches no podrían avanzar. La realidad es que no entran tantos coches procedentes de la calle Yaserías, como para formar colas tan largas que agotasen el tiempo de paso a los vehículos procedentes de la M30. Además, en la animación de la simulación puede verse en la figura 8.4, que normalmente no se ocupan los cuatro carriles de la entrada a la glorieta, con lo que los carriles que están más a la izquierda pueden empezar la marcha desde el primer segundo en que se les permite el paso. En la animación se podrá ver un ejemplo de esto.



*Figura 8.4: Zona de transición saturada.*

Lo primero que se puede deducir de esta imagen es que la mayoría de los vehículos que vienen del paseo de las Yaserías van hacia la zona de transición. Además, se ve que los vehículos se sitúan uno detrás de otro de manera que no ocupan todos los carriles por igual. Esta tendencia también suele ocurrir en la realidad. Los conductores siguen al vehículo precedente sin ocupar la totalidad de los carriles. Sin embargo este fenómeno es contraproducente para los vehículos que vienen desde el paseo de las Yaserías porque no ocupan en su totalidad la capacidad de la zona de transición.

## 8.1. RESULTADOS DE LA ALTERNATIVA.

Tras esta descripción de cómo se ha podido mejorar la entrada a la glorieta de las Pirámides, se va a constatar con datos simulados si realmente mejora la congestión del tráfico. Como primera aproximación, se analizará la animación de la zona.

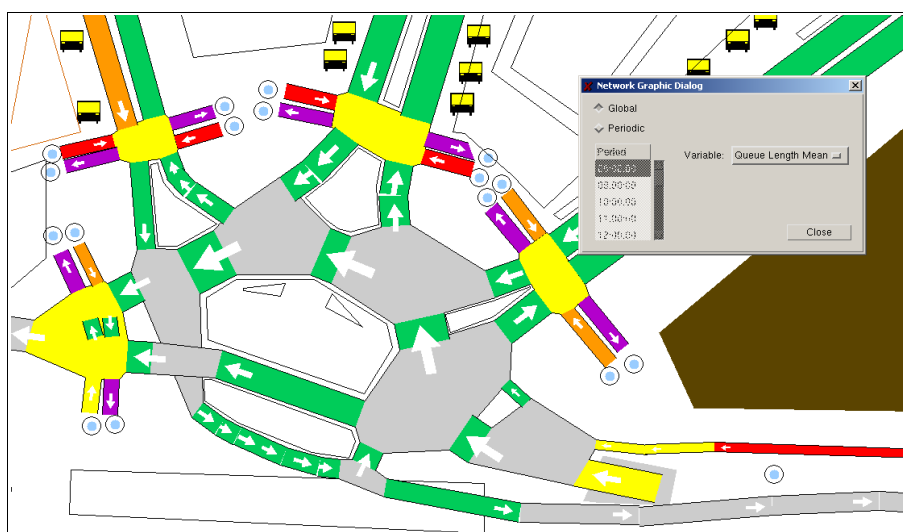
Durante la misma, se ve que la salida de la M30 no parece tan llena de coches como en la situación anterior. Sin embargo, en el paseo de las Yaserías parece formarse una cola de coches que antes no se veía y que pueden causar conflictos. En la figura 8.1.1 se muestra una imagen de cómo se ve la intersección reformada durante la simulación.



*Figura 8.1.1: Diferencias en el tamaño de colas tras la reforma.*

Además, en esta imagen se vuelve a ver cómo los vehículos tienden a formar colas, dejando libres carriles por donde podrían circular.

En los resultados gráficos se puede valorar de manera objetiva si la cola media de espera ha mejorado, y si en consecuencia se ha mejorado la congestión del tráfico. La figura 8.1.2 resume gráficamente este parámetro.



*Figura 8.1.2: Cola media de los vehículos tras reforma.*

La cola media mejora significativamente en la salida de la M30, sin embargo, en el paseo de las Yaserías el resultado es contrario y pasa del color verde al amarillo y rojo.

Numéricamente en la M30 se pasa de tener una cola media de 16,5 vehículos a apenas 2 en la sección inmediatamente anterior a la zona de transición. Para el paseo de las Yaserías, se pasa de tener una cola media de 0,6 vehículos parados en su sección a 14,7. Se trata de un aumento considerable, pero el hecho de que tan sólo hubiera una cola de 0,6 vehículos, en la situación inicial, indica que esta vía tenía preferencia absoluta sobre la M30. Tampoco hay que olvidar que este aumento ha sido en beneficio de un descenso de la cola de la M30.

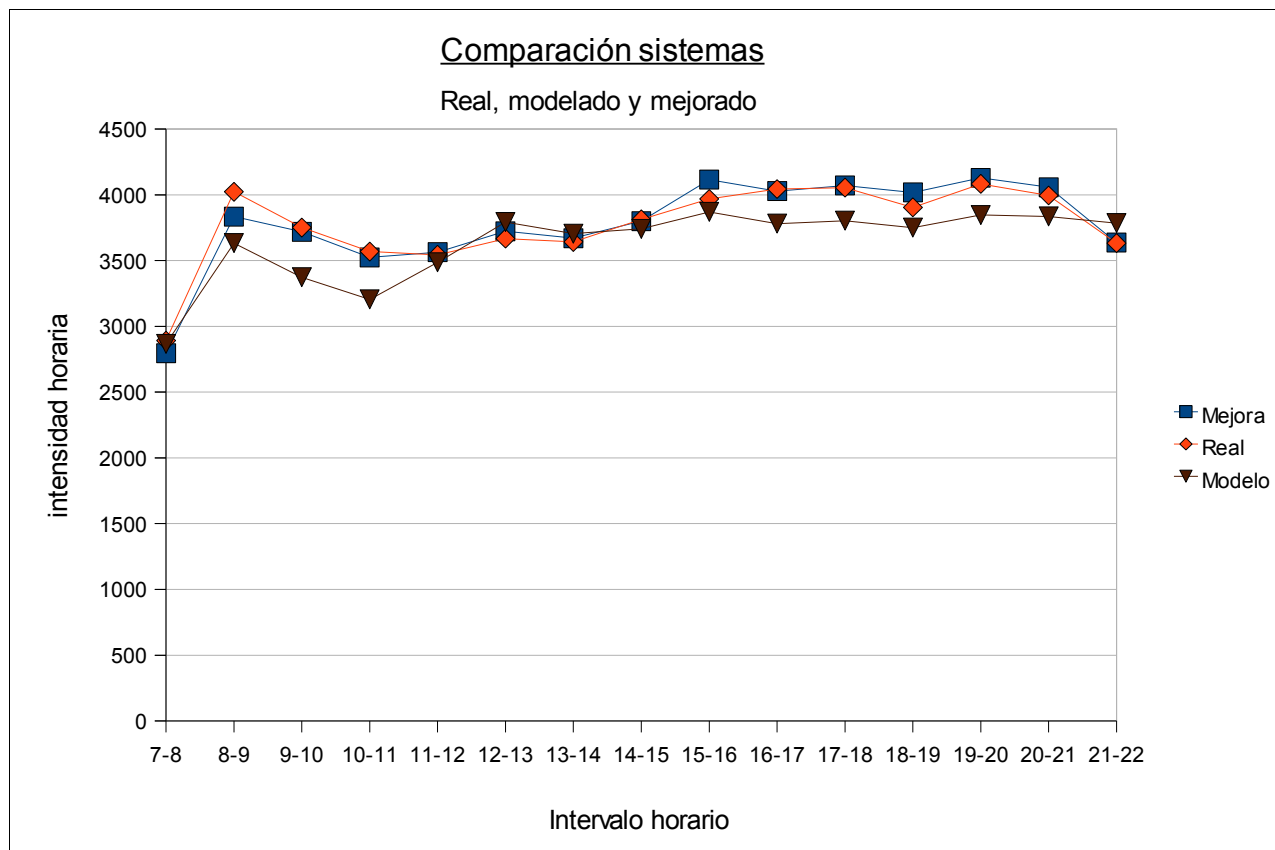
Si se analiza el flujo vehicular para la glorieta completa mirando intervalo a intervalo horario, se obtienen los datos de la siguiente tabla:

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	TOTAL
Mejora	2795	3834	3719	3524	3564	3723	3670	3800	4115	4028	4071	4018	4129	4057	3637	56684
Real	2891	4023	3751	3569	3543	3667	3642	3813	3968	4044	4054	3905	4083	3995	3632	56580
Modelo	2867	3632	3373	3205	3487	3793	3704	3741	3870	3781	3803	3750	3846	3836	3785	54473
Diferencia modelado	-72	202	346	319	77	-70	-34	59	245	247	268	268	283	221	-148	2211
Diferencia real	-96	-189	-32	-45	21	56	28	-13	147	-16	17	113	46	62	5	104
Porcentaje respecto modelo	-2,49	5,02	9,22	8,94	2,17	-1,91	-0,93	1,55	6,17	6,11	6,61	6,86	6,93	5,53	-4,07	3,91
Porcentaje respecto real	-3,35	-5,2	-0,95	-1,4	0,6	1,48	0,76	-0,35	3,8	-0,42	0,45	3,01	1,2	1,62	0,13	0,19

*Tabla 8.1.1: Resultados de cada intervalo horario en la glorieta reformada.*

La reforma mejora todos los registros obtenidos del sistema modelado anteriormente, con un incremento de 2.211 vehículos durante las 15 horas de simulación. Supone un aumento del 3,91%. Se puede ver que los mayores aumentos se dan durante las horas punta, donde el modelo inicial se saturaba y congestionaba.

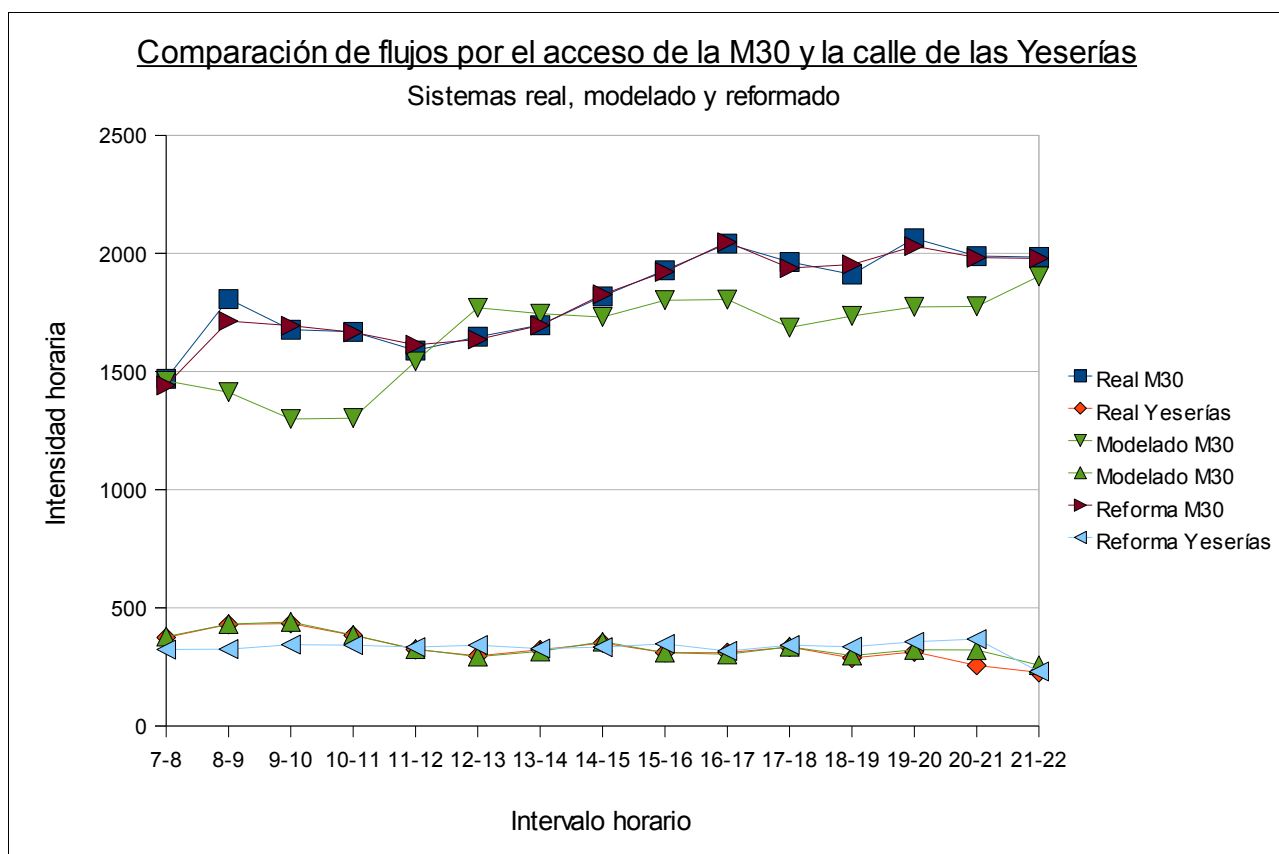
Respecto al modelo real, los valores obtenidos son muy próximos y las diferencias existentes son perfectamente achacables a la naturaleza de la simulación. Si se representan estos datos se obtienen las curvas de la figura 8.1.3.



*Figura 8.1.3: Comparación gráfica de la distribución horaria de intensidades de los 3 sistemas.*

Como ya se veía en los datos anteriores, la curva que representa la alternativa reformada sigue mejor la tendencia de la gráfica real de lo que lo hacía el primer sistema modelado.

Dado que el objetivo de esta alternativa era mejorar el flujo en la entrada por la M30, sería interesante fijarse en los datos de esta vía. En la figura 8.1.4 se representan la distribución de la intensidad horaria para cada intervalo y para los tres sistemas: real, modelado y reformado.



*Figura 8.1.4: Comparación de las intensidades horarias de los 3 sistemas en los accesos por la M30 y por el paseo de las Yaserías.*

Esta gráfica, sin duda, aporta mucha más información interesante y esclarecedora sobre la reforma que se ha llevado a cabo. Las tres curvas de la parte superior representan el flujo de vehículos por hora por la entrada de la M30. Las curvas del sistema real y mejorado siguen una pauta casi idéntica y se ha mejorado muchísimo respecto al sistema modelado. En la parte inferior aparecen otras tres curvas pertenecientes a los tres sistemas por el paseo de las Yaserías. En este caso, son las curvas de los sistemas real y modelado las que van muy parejas mientras que la de la reforma se aleja un poco. De manera objetiva, el desvío de la intensidad en el paseo de las Yaserías es despreciable frente a lo que se ha ganado y mejorado en la entrada por la M30.

A la vista de estas gráficas es inevitable plantearse una reflexión sobre el modelado de sistemas. No hay que olvidar que se trata de sistemas simulados y que es imposible su exactitud con el sistema real. Ahora bien, hay que intentar acotar el error de alguna manera y ser conscientes de que existe. Para las gráficas que representan la M30, se podría pensar que el sistema modelado no está bien calibrado, ya que el sistema reformado se ajusta significativamente mejor a los datos reales. Lo que ocurre es que los datos de los que se dispone son para el modelo sin la reforma y, por tanto no pueden ser comparables. Que la nueva curva con la reforma realizada se ajuste mejor con los datos reales tan solo sirve para demostrar que se ha mejorado la gestión del tráfico en los accesos a la glorieta. A efectos prácticos con la reforma realizada estos accesos están sobredimensionados para los datos de los que se dispone, si se quisiese comparar el buen calibrado entre los dos sistemas cada sistema debería simularse con sus propios aforos reales.



### Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.

Se van a revisar ahora los datos numéricos que representan las gráficas anteriores para tener una prueba menos cualitativa de los efectos de la reforma. En la tabla 8.1.2. aparecen los datos numéricos de los tres sistemas para las dos vías de entrada.

Acceso	Nº vehs realidad	Nº vehs modelo	Nº vehs reforma	Diferencia modelado	% modelado	Diferencia reforma	% reforma
M30	27254	24744	27139	-2510	-9,21	-115	-0,42
Calle Yaserías	4947	5069	4963	122	2,47	16	0,32

*Tabla 8.1.2: Datos numéricos de los aforos en los accesos por la M30 y calle de las Yaserías para los 3 sistemas.*

De esta manera quedan reflejados de manera inequívoca, los efectos producidos por la reforma. Por la M30 pasan 2.400 vehículos más que en el sistema modelado sin reformar. En el paseo de las Yaserías ha disminuido el flujo de vehículos, pero aún sigue teniendo un error de exceso respecto al sistema real, lo que indica que la calle aún no está saturada, aunque si que se ha visto que en horas puntuales el error aumenta y se congestiona.

Sería lógico pensar que debido a que el flujo de vehículos ha aumentado notablemente es muy probable que la cola media haya disminuido y con ello la congestión del tráfico.

## 8.2. RESULTADOS AMBIENTALES.

### 8.2.1. Consumo de combustible.

Parece que con la reforma, al menos el flujo de vehículos ha mejorado, pero no hay que conformarse únicamente con eso. Dado que la mejora no ha sido por un aumento en el número de las vías, ni un aumento en la velocidad máxima de la vía, si no que ha sido una simple modificación en la gestión de un cruce es interesante comprobar cómo ha repercutido en el consumo de combustible.

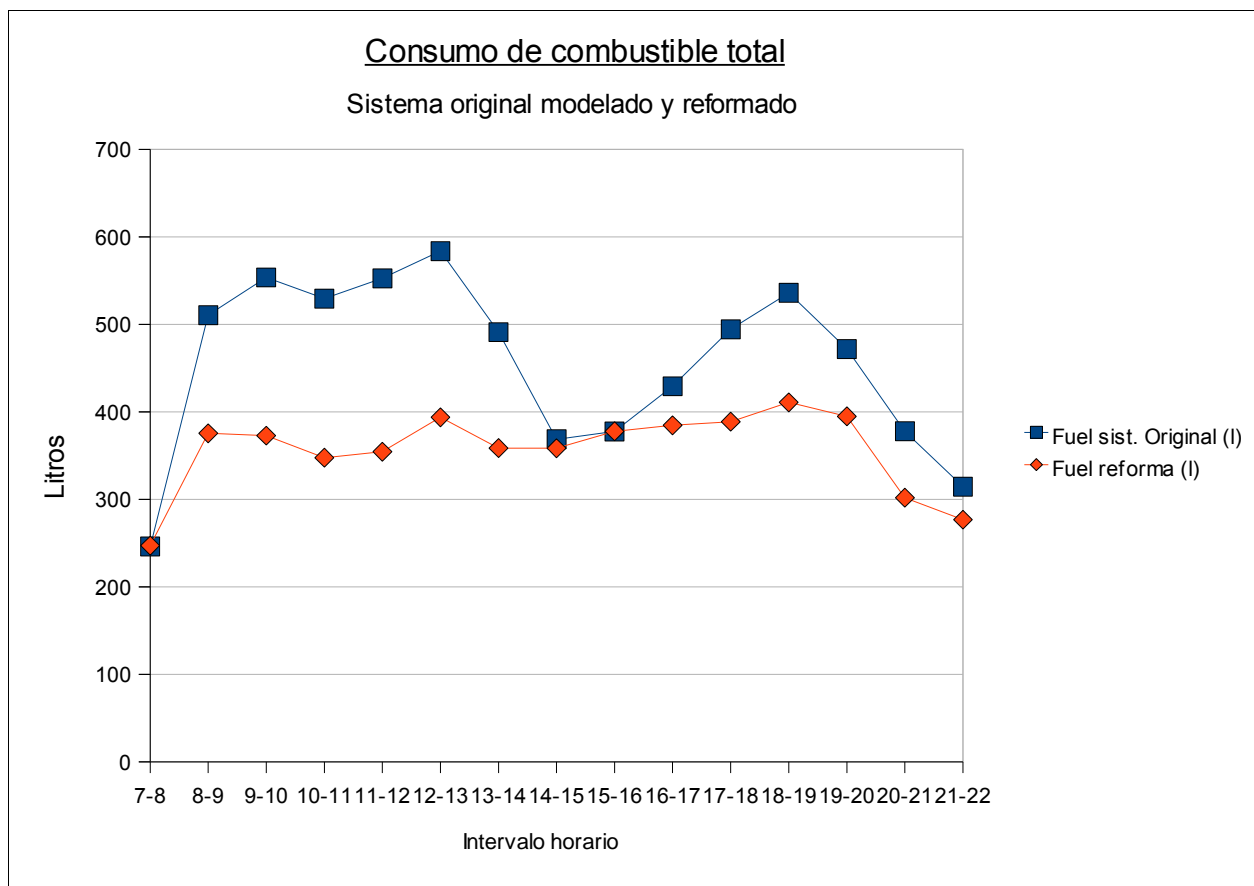
En la tabla 8.2.1. aparecen los datos referentes al gasto de combustible,s tanto para el sistema inicial modelado como para el reformado.

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	TOTAL
Fuel TOTAL (l)	246	510,5	553,6	529,4	552,6	583,8	491,1	368,6	377,6	429,2	494,4	536	471,8	377,7	314,5	6836,8
Fuel reforma (l)	247	375,5	372,8	347,5	354,4	393,8	358,6	358,3	377,8	384,5	388,8	410,8	394,8	301,8	276,7	5343,2

*Tabla 8.2.1: Comparación del gasto de combustible del sistema modelado original frente al sistema reformado.*

Con estos datos puede verse que en prácticamente todos los intervalos ha disminuido el gasto de combustible, y que en algunos casos, como el intervalo de 9 a 10 de la mañana, esta disminución ha sido drástica. En total, se contabiliza un ahorro en combustible de casi 1.500 litros, que representa un ahorro de un **22%**. Una cifra muy significativa. Esta disminución en el gasto de combustible unido a un mayor flujo de vehículos, provoca que el gasto medio por vehículo sea de 23 l/100km, con un ahorro de **6,8 l/100km** frente al sistema original.

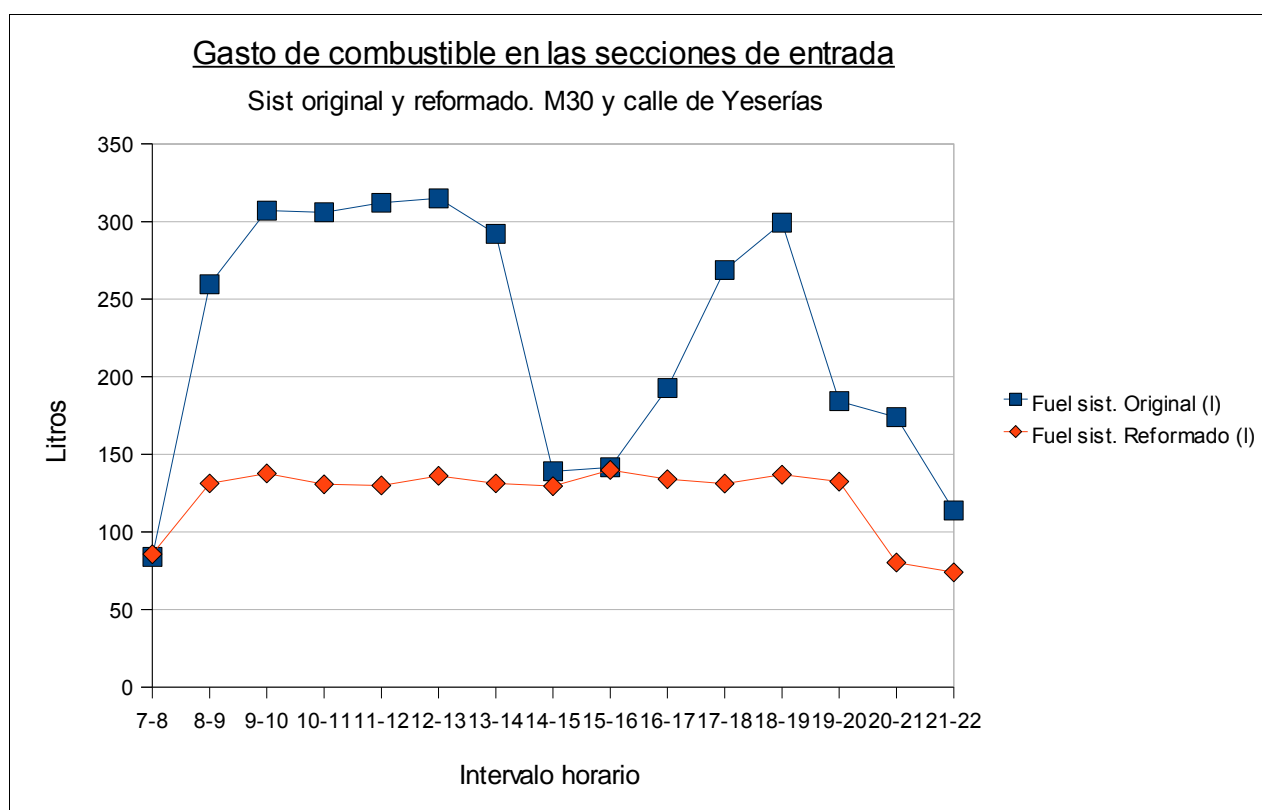
En la figura 8.2.1. aparecen comparadas las dos gráficas de consumo para ambos sistemas:



*Figura 8.2.1: Distribución del gasto horario de combustible para los sistemas original y reformado.*

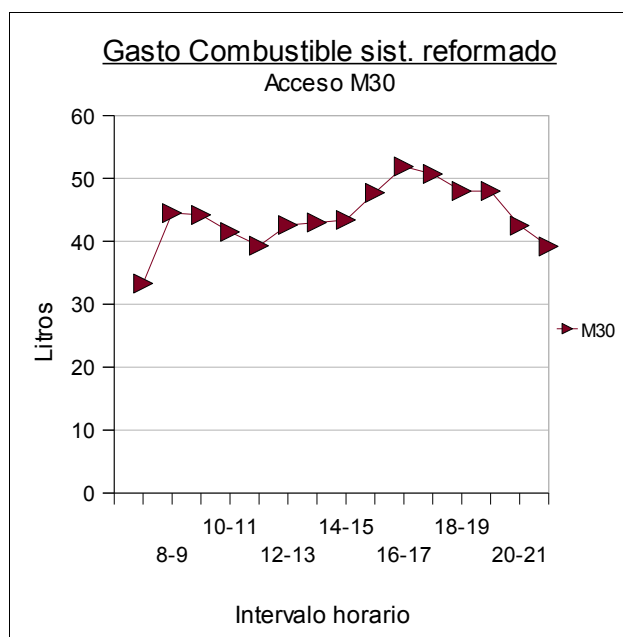
En estas dos gráficas se puede ver cómo, claramente, el sistema original tiene un mayor gasto de combustible frente al reformado, con notables diferencias. También se da el hecho de que para ambas curvas, la pendiente entre dos intervalos consecutivos tienen el mismo signo. Es decir, si para el estado original de un intervalo a otro el consumo aumentaba, pendiente positiva, para el reformado ocurre lo mismo. Esta coincidencia se debe a que los aforos para los dos sistemas son los mismos y es innegable que con reforma o sin reforma, si en un intervalo de tiempo aumenta el flujo de coches, el consumo tiene que aumentar. La diferencia entre ambos sistemas está en el valor de ese aumento, que es directamente proporcional al valor de la pendiente en cada tramo.

Ya que lo único que diferencia ambos sistemas es la reforma en los accesos de la M30 y del paseo de las Yaserías, va a analizarse en más detalle el gasto de combustible en estas secciones. Debido a que con la reforma se variaron las dimensiones de las vías de acceso, no se puede hacer una comparación directa con el sistema original. Además, mientras que el primer sistema tan solo tenía dos vías, ahora existen tres secciones: la salida de la M30, el paseo de las Yaserías y la sección a la que se la ha denominado “zona de transición”. En la figura 8.2.2. se muestran las curvas de consumo de combustible inmediatamente antes de entrar a la glorieta de las Pirámides, que sí son dos casos comparables. En el sistema original, se muestra el gasto conjunto de la salida M30 y el paseo de las Yaserías, y para el sistema reformado, la salida de la M30, el paseo de las Yaserías y la zona de transición.

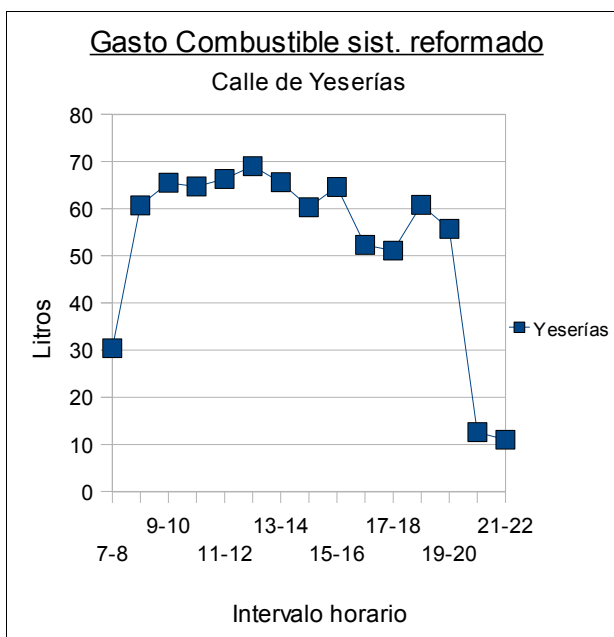


*Figura 8.2.2: Gasto de combustible en las secciones de entrada de la M30 y de la calle de las Yaserías. Sistemas original y reformado.*

Parecido a lo ocurrido con el consumo total, el consumo para estos accesos ha disminuido considerablemente. La razón principal es que para este sistema, además de mejorar el flujo de vehículos, la cola media ha disminuido. Por todo ésto, el gasto de los vehículos parados es menor. Es curioso cómo el consumo conjunto de los accesos por la M30 y por el paseo de las Yaserías es prácticamente constante en el intervalo de 8 de la mañana, y 8 de la tarde. A efectos de consumo de combustible estos dos accesos se encuentran en equilibrio, ya que por separado presentan los picos típicos producidos por un flujo de vehículos y unas colas medias no constantes. En las figuras 8.2.3. y 8.2.4. se muestra el aspecto de estos dos gastos por separado.



*Figura 8.2.3: Gasto de combustible en el acceso por la M30. Sist. Reformado.*



*Figura 8.2.4: Gasto de combustible en el paseo de las Yaserías. Sist. Reformado.*

Los datos numéricos del gasto de combustible en estas dos secciones se presentan en la tabla 8.2.2, con el gasto de combustible de estas dos mismas secciones en el sistema original.

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	TOTAL
Sist. Original (l)	84	259,6	307,1	306	312,1	315	292,1	139,1	141,6	192,76	268,8	299,3	184,3	174	113,8	3389,56
Sist. Reformado (l)	85,7	131,3	137,7	130,7	130	136,1	131,3	129,5	139,9	134	131,2	136,9	132,4	80,3	74	1840,8

*Tabla 8.2.2: Gasto de combustible en los accesos por la M30 y el paseo de las Yaserías. Sistemas original y reformado.*

Tan solo se consumen 1.840 litros de combustible frente a los 3.389 anteriores, lo que supone un ahorro de casi un **46% respecto al sistema original**. Analizando cada acceso por separado en el paseo de las Yaserías el consumo de combustible ha aumentado, pero no el descenso por la calle M30 ha sido mucho mayor.

## 8.2.2. Emisión de contaminantes.

Los datos obtenidos para la simulación total de la glorieta son los que aparecen resumidos en la tabla 8.2.3.

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	TOTAL
CO (Kg)	29,75	46,16	44,65	42,55	43,68	45,38	43,57	45,5	48,24	49,03	50	52,73	53,57	39,58	36,39	670,54
Nox (Kg)	0,76	1,16	1,16	1,13	1,14	1,23	1,14	1,1	1,16	1,18	1,2	1,24	1,17	0,89	0,8	16,47
HC (Kg)	2,91	4,5	44,2	4,42	4,44	4,85	4,45	4,25	4,56	4,6	4,7	5	4,66	3,39	3,07	64,41

*Tabla 8.2.3: Emisión de contaminantes del sistema reformado.*

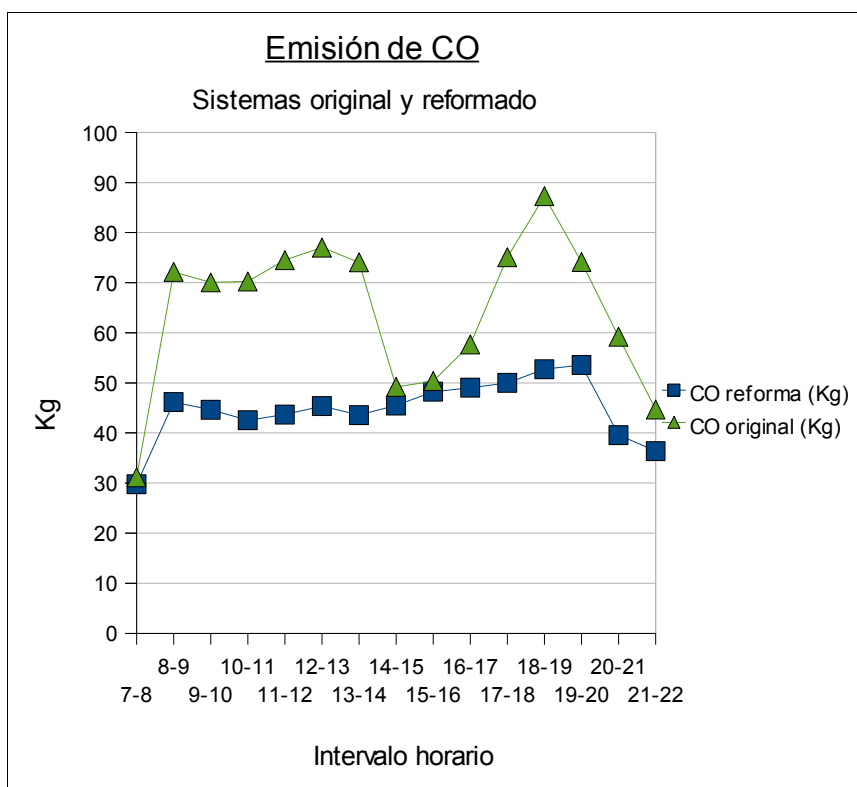
Todos los valores han disminuido respecto al sistema original. En la tabla 8.2.4, se puede ver un resumen con las diferencias entre el sistema original y el reformado.

	Sist. Original (Kg)	Sist. Reformado (Kg)	Diferencia (Kg)	Porcentaje
CO	966,59	670,54	-296,05	-30,63
Nox	22,96	16,47	-6,49	-28,27
HC	89,65	64,41	-25,24	-28,15

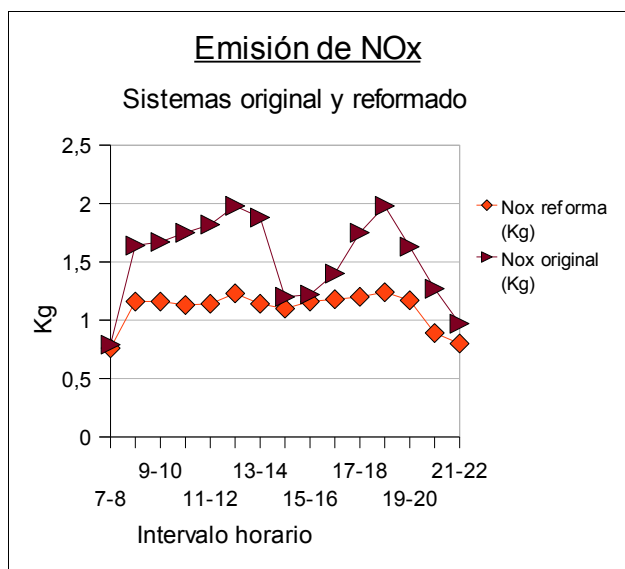
*Tabla 8.2.4: Comparación de emisiones, sistemas original y reformado.*

El descenso de de estos contaminantes ha sido incluso más significativo que el ahorro de combustible. Las razones están, básicamente, relacionados con el funcionamiento de los motores que han sido pensados y diseñados para su funcionamiento con el coche en marcha. Cuando los vehículos se encuentran parados los motores suelen encontrarse alejados de su funcionamiento óptimo, generan más contaminantes que en otras condiciones más favorables.

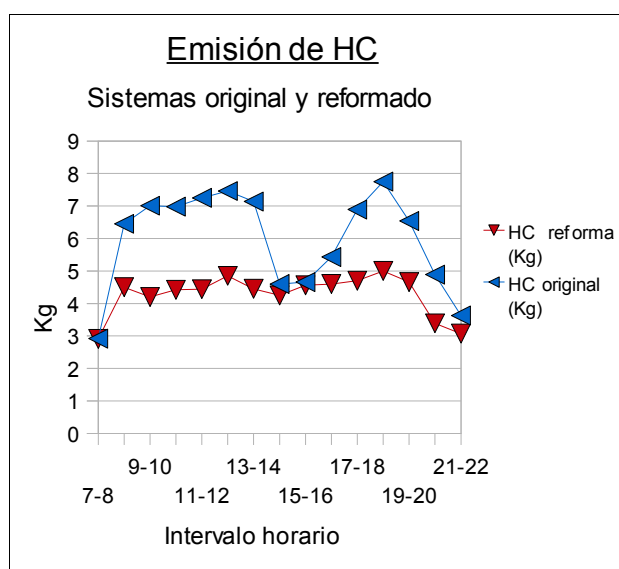
Analizando y comparando las gráficas de ambos sistemas, obtenemos las tres curvas de las figuras 8.2.5, 8.2.6 y 8.2.7.



*Figura 8.2.5: Emisión de CO en los sistemas original y reformado.*



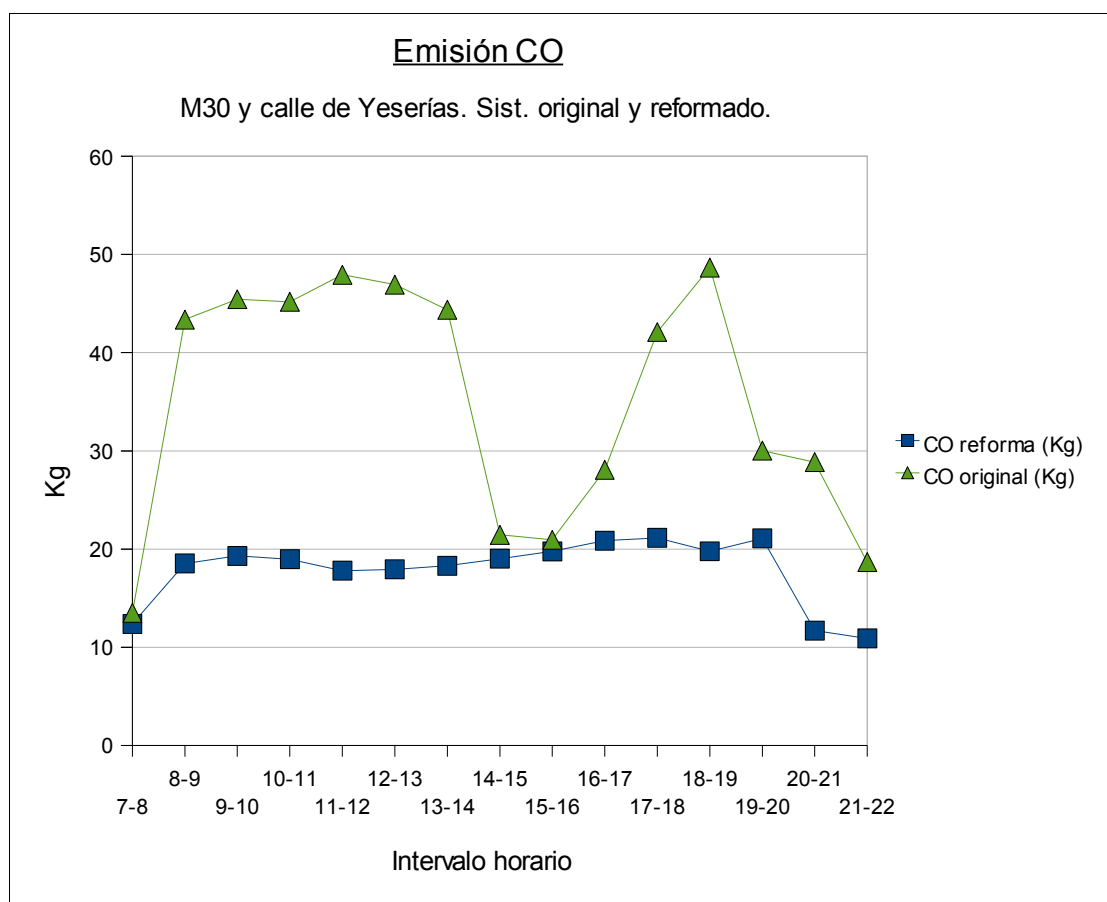
*Figura 8.2.6: Emisión de NOx en los sistemas original y reformado.*



*Figura 8.2.7: Emisión de HC en los sistemas original y reformado.*

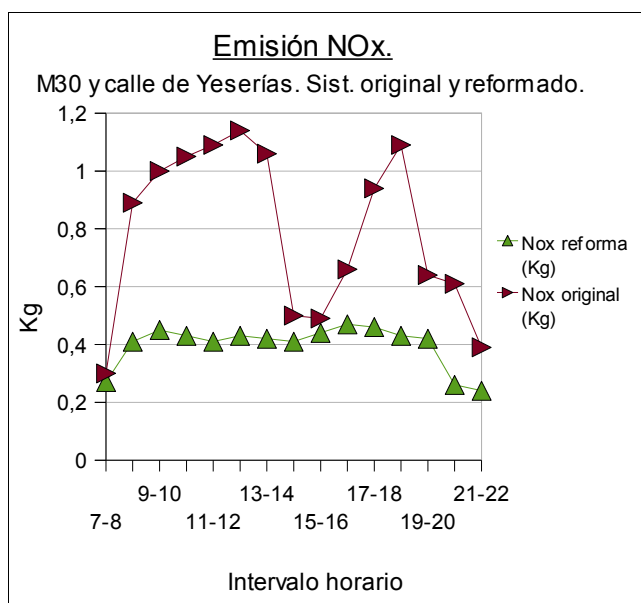
Las curvas de estos contaminantes se asemejan a las de consumo de combustible, aunque en este caso, las diferencias entre las curvas originales y las reformadas son más acusadas.

Por último, se va a realizar el análisis de la emisión de contaminantes en la zona reformada, donde se espera que los resultados sean mejores que en el sistema global. Las figuras 8.2.8, 8.2.9 y 8.2.10 muestran los resultados de las curvas en esta sección.

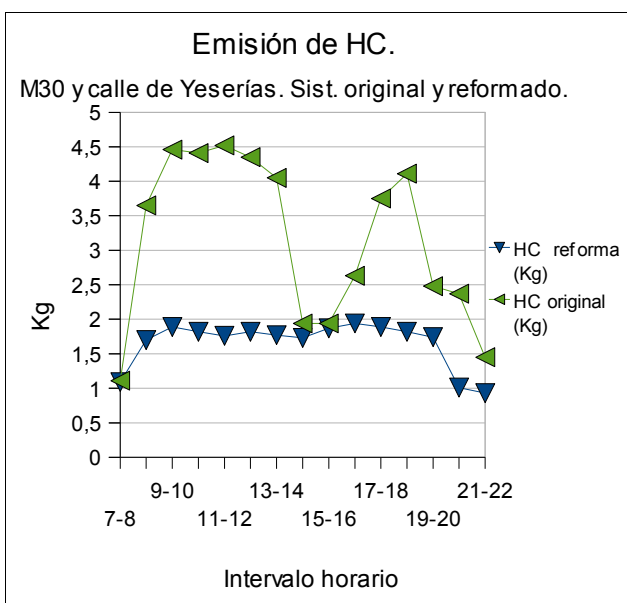


*Figura 8.2.8: Emisión de CO en los accesos por la M30 y el paseo de las Yaserías.*





*Figura 8.2.9: Emisión de NOx en los accesos por la M30 y el paseo de las Yaserías.*



*Figura 8.2.10: Emisión de HC en los accesos por la M30 y el paseo de las Yaserías.*

Los resultados obtenidos son mas positivos que para el sistema global, era algo evidente ya que hasta ahora tanto el tráfico, como el gasto de combustible había mejorado más en estos accesos que en los otros.

Numéricamente en las tablas 8.2.5 y 8.2.6 se recogen datos relevantes sobre la emisión de contaminantes antes y después de la reforma en estas dos secciones.

	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	TOTAL
CO reforma (Kg)	12,38	18,53	19,3	18,97	17,79	17,93	18,29	19,02	19,76	20,85	21,14	19,77	21,08	11,69	10,89	267,38
Nox reforma (Kg)	0,27	0,41	0,45	0,43	0,41	0,43	0,42	0,41	0,44	0,47	0,46	0,43	0,42	0,26	0,24	5,95
HC reforma (Kg)	1,09	1,7	1,89	1,82	1,76	1,82	1,77	1,73	1,87	1,94	1,89	1,82	1,74	1,01	0,93	24,8
CO original (Kg)	13,51	43,37	45,44	45,17	47,94	46,93	44,36	21,45	20,94	28,06	42,1	48,66	30,02	28,85	18,67	525,47
Nox original (Kg)	0,3	0,89	1	1,05	1,09	1,14	1,06	0,5	0,49	0,66	0,94	1,09	0,64	0,61	0,39	11,85
HC original (Kg)	1,11	3,65	4,46	4,41	4,52	4,35	4,05	1,94	1,94	2,63	3,75	4,11	2,48	2,37	1,45	47,22

*Tabla 8.2.5: Emisión de contaminantes en los sistemas original y reformado. Accesos por la M30 y el paseo de las Yaserías.*

	Sist. Original (Kg)	Sist. Reformado (Kg)	Diferencia (Kg)	Porcentaje
CO	525,47	267,38	-258,1	-49,12
Nox	11,85	5,95	-5,9	-49,79
HC	47,22	24,8	-22,42	-47,48

*Tabla 8.2.6: Comparación de emisiones de los sistemas original y reformado. Accesos por la M30 y el paseo de las Yaserías.*

### *Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.*

Estos resultados tan sumamente positivos demuestran lo beneficioso que puede ser para el medio ambiente y la salud humana una pequeña modificación en la gestión del tráfico. Los descensos de estos contaminantes son casi del 50% y teniendo en cuenta que este descenso es cada 15 horas, sumados durante una semana es mucho, Bastante más durante un mes, un año y durante toda la vida de la glorieta. Además estos datos tienen algunos agravantes para la zona de estudio. Por ejemplo, la salida de la M30 proviene de un túnel y es donde mayor cantidad de contaminantes se generan. Los espacios cerrados, como los túneles, tienen mala ventilación y la emisión de contaminantes dentro de los mismos pueden tener efectos que al aire libre no ocurrirían. Además, se recuerda que el CO es un gas **mortal** a partir de ciertas concentraciones, por lo que es muy importante disminuir su generación y más aún en el lugar de estudio donde estos gases tienen difícil salida.

## **9. CONCLUSIONES.**

Una vez obtenidos todos los resultados para el presente estudio, y como final para el presente proyecto fin de carrera, se analizará la consecución de los objetivos perseguidos, expuestos al comienzo del documento, y las conclusiones deducidas tras la realización del mismo.

1. Se han definido y analizado las principales variables de tráfico (intensidad, velocidad y densidad), así como las relaciones entre ellas.

2. Se han definido y analizado los tres principales contaminantes producidos por el sector del transporte, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos no quemados; así como sus consecuencias en la salud y el medio ambiente. También se han estudiado algunas tecnologías emergentes como los motores híbridos, o las tecnologías basadas en el hidrógeno.

3. Se ha analizado de dónde y en qué momentos, el consumo de combustible y la emisión de contaminantes es crítica, y se puede decir que:

- Los vehículos pesados y autobuses ganan importancia en estos dos aspectos, pese a que su número es inferior a la de los vehículos ligeros, la suma de ambos consume combustible y genera contaminantes de manera comparable a la totalidad de los vehículos ligeros.
- La mayoría del gasto de combustible y emisión de contaminantes se da cuando los vehículos se encuentran atascados. El hecho de estar parados hace que se congreguen muchos vehículos que sin estar avanzando se encuentran gastando combustible y generando más contaminantes. Es prioritario evitar las congestiones, no solo por la mejora del tráfico, si no porque las reducciones de emisiones pueden llegar a ser del orden de la mitad.

4. Utilizando las herramientas que GETRAM ofrece, se consiguió modelar los pasos de peatones. No obstante, este programa está orientado a las vías y vehículos a motor y el modelado de peatones tiene algunas limitaciones.

### *Simulación Medioambiental del Tráfico en las Cercanías de la Glorieta de las Pirámides.*

5. Se ha realizado una breve introducción al diseño de figuras 3D para poder ser incorporadas en el módulo AIMSUN3D de GETRAM. Se hizo especial hincapié en las peculiaridades que se deben tener en cuenta al importar figuras al formato que utiliza GETRAM, aspectos que pueden ser muy útiles para futuros trabajos que utilicen esta herramienta.

6. Se ha estudiado la influencia de un buen diseño viario con el caso práctico de la glorieta de las Pirámides de Madrid, comparando su diseño previo y posterior a la reforma.

7. Se ha estudiado el comportamiento anterior y posterior a la reforma, tanto desde el punto de vista del tráfico como del ambiental y se ha podido deducir que:

- Un mal diseño puede provocar que vehículos procedentes de vías con una intensidad horaria pequeña entorpezcan el paso de vehículos con una intensidad horaria mayor, provocando atascos y aglomeraciones que pueden ser evitadas con una mejor gestión.

- Es importante evitar el cruce de vehículos simultáneo que provengan de dos vías diferentes en un mismo cruce. Se ha demostrado que es más eficiente permitir el paso secuencialmente a cada vía que hacerlo al mismo tiempo, sobretodo en vías con varios carriles.

- Cuando la proporción de motocicletas es pequeña frente al resto de vehículos su influencia, tanto en el tráfico como en los aspectos ambientales, es muy pequeña. Debido a sus dimensiones, pesos y consumos no generan atascos, si no que incluso, pueden realizar adelantamientos mientras el resto de vehículos se encuentran parados.

- Los aspectos ambientales referentes al comportamiento previo y posterior a la reforma, se encuentran resumidos en el tercer punto de las conclusiones.

## **10. ESTUDIOS FUTUROS**

Debido a la complejidad y a las posibilidades de estudio que ofrecen tanto el programa GETRAM como la vía de estudio, se dan a continuación algunas posibles ideas para futuros estudios.

- La glorieta de las Pirámides se encuentra próxima al estadio de fútbol Vicente Calderón, por lo que los días en los que hay espectáculos los aforos en la glorieta son diferentes, y en ocasiones se cierran calles y se redirecciona el tráfico. Se podría simular el comportamiento en la glorieta bajo estas condiciones y buscar alternativas a los problemas que pudiera haber.

- Se podría hacer un estudio con los aforos pertenecientes a otro día de la semana. Se propone utilizar un domingo, ya que coincide con la implantación del Rastro y la afluencia de tráfico es muy diferente a la de un día entre semana.

- Se ha simulado que la llegada de los vehículos, para cada intervalo horario, siguiera una distribución uniforme. Se podría realizar otro estudio variando la llegada de vehículos de manera exponencial, polinómica... y ver qué consecuencias tiene.

- GETRAM ofrece la posibilidad de variar ciertas condiciones durante la simulación, tales como posibles accidentes, cierres de carriles... Se podría hacer un estudio del comportamiento de la red al cambiar algunos de estos parámetros durante la simulación.

- Se ha demostrado que los atascos provocan que las emisiones de contaminantes se disparen. Podría simularse cómo variarían estos datos si durante los atascos, los vehículos apagasen el motor, incluso, se podría hacer un planteamiento diferente modelando vehículos con motores híbridos en lugar de los motores de combustión interna actuales.

## **11. BIBLIOGRAFÍA.**



1. DÍAZ LÓPEZ, Vicente; LÓPEZ BOADA, Beatriz; LÓPEZ BOADA, María Jesús; et al. *Transportes*. Madrid: UNED 2006.
2. ROSA AZCONA, Fernando de la. *Simulación del comportamiento del tráfico en el entorno de Conde de Casal*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2008. .
3. FERNÁNDEZ DÍAZ, Alfredo. *Estudio vía simulación del tráfico en la plaza de la Independencia de Madrid*. Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Mecánica, 2004.
4. LECUONA NEWMAN, Antonio. *Apuntes Ingeniería Medioambiental*. Material Didáctico, Universidad Carlos III de Madrid, Departamento de Ingeniería Térmica y de Fluidos, 2004.
5. G. KIELY. *Ingeniería Ambiental*. McGraw-Hill, 1999.

6. TSS – Transport Simulation System. *GETRAM TEDI v1.4 User Manual*, Noviembre 2002.
7. TSS – Transport Simulation System. *GETRAM AIMSUN v4.1 User Manual*, Noviembre 2002.
8. TSS – Transport Simulation System. *GETRAM AIMSUN 3D v1.0 User Manual*, Noviembre 2002.
9. Akcelic. *Progress in Fuel Consumption Modelling for Urban Traffic*. Management. Australian Road Research Board Research Report ARR No. 124, 1982.
10. ( British) DEPARTMENT OF TRANSPORT (1994), *New Car Fuel Consumption : the official figures December 1994*, UK DoT.
11. FERREIRA, L.J.A. *Car Fuel Consumption in Urban Traffic. The Results of a Survey in Leeds using Instrumented Vehicles*. ITS Working Paper No. 162, Institute for Transport Studies, University of Leeds, 1982.
12. QUARTET Deliverable N°2, Assessment of current Tools for Environmental Assessment in QUARTET, DRIVE II Project V2018: QUARTET, September 1992.
13. LAW, AVERILL M.; KELTON W. David, *Simulation Modeling and Analysis*. McGraw-Hill International Editions. Second Edition. 1991.
14. Madrid, España. Ordenanza Municipal ANM 2005/48 del 26 de Septiembre. *Ordenanza de Movilidad para la Ciudad de Madrid*, 26/09/2005.

## **12. ANEXO I**